

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Luis Carlos Pais Lopes Oliveira

Dissertação do MIEM

Orientadores:

Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu

Prof. António Manuel Ferreira Mendes Lopes



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Porto, Julho de 2013

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Experientia praestantior arte

Resumo

Nos tempos que correm, em que a procura por produtos de qualidade e em quantidades elevadas, a necessidade das empresas se adaptarem e modernizarem é cada vez maior. Como tal, a produção automatizada toma um papel preponderante para essas mesmas empresas.

Recentemente, tem-se vindo a observar um aumento da integração de robôs nos processos de produção, nomeadamente, em áreas da maquinagem, devido à sua enorme área de trabalho e flexibilidade. Porém, existem alguns fatores que ainda fazem com que as empresas fiquem receosas em aplicar esta tecnologia, sendo um deles a dificuldade na da programação.

Foi tendo em conta esta complexidade, que os distribuidores de *software* CAD/CAM decidiram desenvolver soluções que adaptassem os já existentes recursos para máquinas-ferramenta ao robôs.

A realização deste trabalho tem como meta a aplicação dos referidos *softwares* na maquinagem de geometrias complexas, recorrendo a uma célula robótica. Deverão ser efetuados diversos programas de comando numérico gerado por uma aplicação CAD/CAM, que posteriormente será convertido para a linguagem RAPID, para ser utilizado por um robô da marca ABB. Estes programas deverão ser validados no *software* de programação *offline* desta marca, o RobotStudio®, e de seguida implementados na célula robótica.

Numa fase inicial o trabalho consistiu no enquadramento dos temas associados e no estudo aprofundado das as soluções já existentes. De seguida, houve uma familiarização com os programas que viriam a ser utilizados e na configuração de toda a estação de trabalho. Por fim, realizaram-se testes em ambiente virtual e na célula robótica real, podendo assim analisar alguns fatores.

A maquinagem de geometrias complexas obriga o robô a realizar movimentos complexos, não sendo fácil por vezes encontrar soluções viáveis para estes serem possíveis. Os programas de CAD/CAM ainda não constituem uma solução final pois acarretam alguns erros, nomeadamente na cinemática do robô, mas grandes avanços se esperam nessa área.

Abstract

In these days, when the demand for quality products and in bigger quantity is very high, the need of the companies to adapt and modernize is increasing. As such, the automated production takes a leading role for these same companies.

More recently, it has been observed an increase in the integration of robots in production processes, in particular in the areas of machining due to its huge work envelope and flexibility. However, there are some factors that make companies still are afraid to apply this technology; one of them is the difficulty of their programming.

It was in view of this complexity, the CAD/CAM software distributors decided to develop solutions that adapt existing resources for machine-tools to the robots.

The realization of this work aims the application of those software in machining complex geometries using a robotic cell. Should be made several numerical control programs generated by a CAD/CAM application, which will later be converted for RAPID language, to be used by a robot ABB brand. These programs should be validated in the offline programming software of this brand, the RobotStudio®, and then implemented in the robotic cell.

At an early stage the work consisted in framing issues associated with and in-depth study with the existing solutions. Then there was a familiarity with the programs that would be used and in the configuration of the entire workstation. Finally, tests were performed in virtual environment and real robotic cell, so you can analyze some factors.

The machining of complex geometry requires the robot to perform complex movements, it is not easy sometimes to find viable solutions to these being possible. CAD/CAM programs still do not constitute a final solution as result in some errors, notably in robot kinematics, but major breakthroughs are expected in this area.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, os Professores Paulo Abreu e António Mendes Lopes, por toda a paciência durante este projeto e por me orientarem para o caminho mais correto.

Ao Professor Francisco Freitas, por ser um conselheiro e por, durante o semestre, dar a oportunidade a todos de conhecer outras áreas da Engenharia Mecânica, nomeadamente nas visitas que fizemos.

Ao INEGI, na pessoa da Eng^a Célia Novo, por disponibilizar o material para a realização dos ensaios.

Ao Sr. Joaquim e ao Sr. Ramalho, por disponibilizarem todas as condições nos laboratórios.

À minha família, por sempre me terem dado condições e apoio durante todo o meu percurso escolar e académico. Um muito Obrigado.

Finalmente, aos meus amigos por terem sido os meus companheiros durante esta viagem que foi a nossa vida académica. Partilhamos muitos momentos e aprendemos que nem todo o conhecimento vem nos livros. Foi um prazer privar convosco durante a realização deste curso que, com este documento, se concluí.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos do trabalho	3
1.2.	Organização dos temas abordados no relatório	3
2.	Maquinagem	5
2.1.	Maquinagem e máquinas-ferramenta.....	5
2.2.	Fresagem	6
2.3.	Comando Numérico Computadorizado	9
2.4.	Maquinagem de alta velocidade (HSM)	12
2.5.	Parâmetros importantes.....	13
3.	Robôs Industriais	15
3.1.	Principais fabricantes	17
3.2.	Programação de robôs	21
4.	Aplicação de robôs industriais em aplicações de maquinagem.....	29
4.1.	Robôs para operações de maquinagem	29
4.2.	<i>Software</i> para operações de maquinagem com robôs	33
4.3.	Aplicações existentes no mercado	41
5.	Configuração da célula robótica utilizada	45
5.1.	Célula robótica real	45
5.2.	Célula robótica virtual	52

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

6.	Maquinagem em 3 eixos.....	59
6.1.	Material escolhido.....	59
6.2.	Escolha da velocidade de avanço e rotação da ferramenta.....	61
6.3.	Maquinagem de um paralelepípedo.....	63
7.	Maquinagem em 5 eixos.....	73
7.1.	Maquinagem de um molde de um rato.....	73
7.2.	Maquinagem de um rotor.....	79
7.3.	Maquinagem de um puzzle de geometria complexa.....	86
8.	Conclusões e trabalhos futuros.....	93
9.	Referências.....	97
	Anexos.....	101
	Anexo A - Datasheet do robô industrial ABB IRB2400/16.....	103
	Anexo B - Datasheet do controlador ABB IRC5.....	106
	Anexo C - Datasheet da mesa posicionadora ABB IRPB C-500.....	109

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Vendas mundiais de robôs de 1994 até 2012 [1].	2
Figura 1.2 - Aplicações de robôs industriais por indústria e por aplicação [2].	2
Figura 2.1 - Requisito de potência para um motor de árvore [6].	6
Figura 2.2 - Tipos de fresagem (a) cilíndrica (b) de topo [7].	6
Figura 2.3 - Fresagem a "empurrar" (esquerda) e a "puxar" (direita) [8].	7
Figura 2.4 - Disposição das navalhas de uma fresa. Direitas (à esquerda) e helicoidais (à direita) [10].	8
Figura 2.5 - Esquema de um sistema CNC [13].	10
Figura 2.6 - Componentes de um módulo CNC [14].	11
Figura 2.7 - Diferenças entre as normas ISO 6893 e STEP-NC [15].	11
Figura 2.8 - Efeito da velocidade de maquinagem na temperatura da peça removida [17].	12
Figura 2.9 - Influência da velocidade em vários fatores da maquinagem [17].	13
Figura 2.10 - Passo de uma operação de maquinagem.	13
Figura 2.11 - Definição de <i>stepdown</i> em maquinagem	14
Figura 3.1 - Configuração típica de um robô industrial.	15
Figura 3.2 - Robô de estrutura em série (à esquerda) e de estrutura em paralelo (à direita).	16
Figura 3.3 - Países em que a ABB está presente [15].	17
Figura 3.4 - ASEA IRB6, o primeiro robô industrial [19].	18
Figura 3.5 - Gama de robôs da marca Fanuc [20].	19
Figura 3.6 - Complexo fabril da Fanuc no monte Fuji [20].	19
Figura 3.7 - O Robotcoastear.	20
Figura 3.8 - Programação através de <i>manual leadthrough</i> [21].	21
Figura 3.9 - Exemplo de consolas de programação de diferentes fabricantes [21].	22
Figura 3.10 - Exemplo de um <i>software</i> de programação <i>offline</i> de robôs.	23
Figura 3.11 - Ambiente virtual no programa RobotStudio® da ABB [19].	25
Figura 3.12 - Virtual FlexPendant do RobotStudio® da ABB [19].	26
Figura 3.13 - Hierarquia dos sistemas de coordenadas do RobotStudio® [22].	27
Figura 3.14 - Robô no mesmo ponto com configurações diferentes [22].	28
Figura 4.1 - Robô ABB 6660 205/1.9 (esquerda) e o seu respetivo volume de trabalho [23].	30
Figura 4.2 - Menu de controlo do <i>Spindle</i> no FlexPendant da ABB [23].	30
Figura 4.3 - Robô Fanuc F-200iB [24].	31
Figura 4.4 - Robô KUKA KR 500-3 MT [25].	31

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Figura 4.5 - Robô Staubli RX 170 HSM [26].	32
Figura 4.6 - Oferta de motores-árvore para o RX 170 HSM [26].	32
Figura 4.7 - Método de execução com o PowerMill Robot Interface [28].	34
Figura 4.8 - Ferramenta de CAD do Mastecam [31].	35
Figura 4.9 - Criação de um <i>toolpath</i> (linhas a azul) no Mastercam® [32].	35
Figura 4.10 - Ambiente de simulação no Mastercam® [33].	36
Figura 4.11 - Exemplo de programa NC criado no Mastercam® (à direita) [34].	36
Figura 4.12 - Opção Worspace no RobotMaster®.	37
Figura 4.13 - Funcionalidades básicas de <i>Optimization</i> no RobotMaster®.	38
Figura 4.14 - Opções avançadas de <i>Optimization</i> no RobotMaster®.	38
Figura 4.15 - Esquema representativo do <i>FCPressureProcess</i> da ABB [35].	39
Figura 4.16 - Esquema representativo do <i>FCSpeedChangeProcess</i> da ABB [35].	39
Figura 4.17 - <i>Wizard</i> do Machining PowerPac da ABB	40
Figura 4.18 - Escultura produzida pela Johnsons Wellfield Quarries [36].	41
Figura 4.19 - Célula robótica da Garner Holt Productions [37].	42
Figura 4.20 - Maquinagem de um molde para a Audi. Processo desenvolvido pela Simtech Systems [39].	42
Figura 4.21 - Robô KUKA a lixar uma prótese ortopédica Aesculap [40].	43
Figura 4.22 - Maquinagem de uma prancha de surf na Tromes Design [41].	43
Figura 5.1 - Robô Industrial ABB IRB 2400/16 [42].	46
Figura 5.2 - Controlador ABB IRC5 [43].	47
Figura 5.3 - Mesa posicionadora ABB IRPB C-500 [44].	48
Figura 5.4 - Sensor de Força ATI Delta IP60 [45].	49
Figura 5.5 - Sistema de mudança de ferramenta Schunk SWS-011 [46].	50
Figura 5.6 - <i>Spindle</i> PDC XLC70.	50
Figura 5.7 - Modelo SolidWorks® do <i>Spindle</i> XLC70.	52
Figura 5.8 - <i>Assembly</i> do conjunto terminal acoplado no robô.	53
Figura 5.9 - Robô na sua posição “home”.	53
Figura 5.10 - Ficheiros da ferramenta necessários para RobotMaster®.	54
Figura 5.11 - Pormenor do ficheiro .XML utilizado para definir a ferramenta no RobotMaster®.	55
Figura 5.12 - Célula robótica virtual utilizada.	56
Figura 5.13 - <i>Force Control LoadID</i> .	56
Figura 5.14 - Definição do <i>tool center point</i> .	57
Figura 5.15 - Menus para criação de ferramentas no RobotStudio®.	58
Figura 6.1 - Material escolhido para maquinar, espuma de poliuretano expandido de 55kg/m ³ .	59
Figura 6.2 - Fresa utilizada (à esquerda) e respetivo esquema no Mastercam® (à direita).	60
Figura 6.3 - Especificações da pinça utilizada [46].	61
Figura 6.4 - Resultados do teste de velocidade de avanço e rotação.	62
Figura 6.5 - Modelação de um rectângulo em Mastercam® X5.	63
Figura 6.6 - Criação de um <i>extrude</i> em Mastercam® X5.	64
Figura 6.7 - Escolha do tipo de máquina em Mastercam® X5.	64
Figura 6.8 - Escolha do tipo de operação em Mastercam® X5.	65
Figura 6.9 - Escolha das faces a maquinar.	65

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Figura 6.10 - Definição dos parâmetros de maquinagem.....	66
Figura 6.11 - Definição das tolerâncias.....	67
Figura 6.12 - Toolpath criado (linhas azuis) em ambiente virtual.....	67
Figura 6.13 - Definição dos parâmetros globais no RobotMaster®.....	68
Figura 6.14 - Definições locais no RobotMaster®.....	69
Figura 6.15 - Ambiente de simulação do RobotMaster®.....	69
Figura 6.16 - Ficheiro com o código RAPID criado.	70
Figura 6.17 - Simulação do processo em RobotStudio® (a azul o <i>colision set</i> escolhido).	71
Figura 7.1 - Ficheiro do molde do rato importado.	74
Figura 7.2 - Superfície escolhida para a primeira operação de maquinagem do molde do rato.	74
Figura 7.3 - <i>Toolpath</i> da primeira operação de maquinagem do molde do rato.....	75
Figura 7.4 - <i>Toolpath</i> criado para maquinagem das faces laterais do rato.	75
Figura 7.5 - Menu <i>Optimization</i> para as duas operações do molde do rato.	76
Figura 7.6 - Menu <i>Optimization</i> para a junta 4 nas operações do molde do rato.	76
Figura 7.7 - <i>Paths</i> gerados para a maquinagem do molde do rato.	77
Figura 7.8 - Bloco utilizado para maquinar o molde do rato.....	78
Figura 7.9 - Resultados da maquinagem do molde do rato.	78
Figura 7.10 - Exemplo de um rotor(à esquerda) e de uma das suas aplicações, um turbocompressor (à direita).....	79
Figura 7.11 - Modelo do rotor importado.....	79
Figura 7.12 - Opção escolhida para maquinar o "chão" do rotor.	80
Figura 7.13 - Menu de escolha dos parâmetros para a operação <i>Impeller Floor Surface Without Tilted Curve</i>	80
Figura 7.14 - Superfícies escolhidas para controlo.....	81
Figura 7.15 - Trajeto obtido.....	81
Figura 7.16 - Menu <i>Optimization</i> para a operação de maquinagem do rotor.....	82
Figura 7.17 - Simulação do processo de maquinagem do rotor.	83
Figura 7.18 - Rotina de desbaste para a maquinagem do rotor.	83
Figura 7.19 - Bloco de material a partir do qual se maquinou o rotor.....	84
Figura 7.20 - Resultado do primeiro ensaio da maquinagem do rotor.	84
Figura 7.21 - Menu <i>Workspace</i> para as três operações do segundo ensaio de maquinagem do rotor.....	85
Figura 7.22 - Resultados do segundo ensaio de maquinagem do rotor.	85
Figura 7.23 - Cubo a maquinar, puzzle completo à esquerda, uma das partes à direita.	86
Figura 7.24 - <i>Toolpath</i> do contorno do cubo inicial.	86
Figura 7.25 - <i>Toolpath</i> de desbaste do cubo inicial.....	87
Figura 7.26 - Menu <i>Optimization</i> para as 2 operações iniciais do puzzle.....	87
Figura 7.27 - Modelo de metade do cubo importado, a amarelo a face a maquinar.	88
Figura 7.28 - Linha de controlo do eixo da ferramenta (a roxo).	88
Figura 7.29 - Toolpath criado para a peça do cubo (linhas a azul).....	89
Figura 7.30 - Acabamento da superfície.....	89
Figura 7.31 - Menu <i>Optimization</i> para as 3 operações finais do puzzle.....	90
Figura 7.32 - Trajeto da primeira operação do puzzle no RobotStudio®.	90
Figura 7.33 - Bloco de material para o primeiro ensaio de maquinagem do puzzle.	91

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Figura 7.34 - Resultado do primeiro ensaio da maquinagem do puzzle.....	91
Figura 7.35 - Resultado do 2º ensaio da maquinagem do puzzle.....	92

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de fresagem [10].....	7
Tabela 2 - Tipos de fresa [10].....	8
Tabela 3 - Vantagens e Desvantagens do CNC [9]	9
Tabela 4 - Linguagem de programação de diferentes fabricantes.	22
Tabela 5 - <i>Software</i> de programação <i>offline</i> de diferentes fabricantes.....	24
Tabela 6 - <i>Software</i> de programação <i>offline</i> genérico.	24
Tabela 7 - Gama de materiais maquináveis pelo <i>spindle</i> XLC70 [20].....	51
Tabela 8 - Valores de massa e centro de massa do <i>Spindle</i> XLC70.....	57
Tabela 9 - Características da ferramenta usada.	60
Tabela 10 – Resultados do ensaio de velocidade de avanço e rotação da ferramenta.....	62
Tabela 11 - Opções adicionais da trajetória do molde do rato.	77
Tabela 12 - Opções adicionais da trajetória do rotor.....	82

1. Introdução

Atualmente, a indústria de produção está cada vez mais competitiva. A crescente procura por mais produtos, com melhor qualidade e a um preço mais baixo, levou a que as empresas apostassem mais na inovação tecnológica, quer a nível de equipamentos e *software*, mas também a nível organizacional. Assim, estas empresas conseguem manter-se competitivas e atuais.

Esta adaptabilidade permite não só obter produtos mais baratos, com melhor qualidade e em maior quantidade, mas também permite às empresas reagirem mais facilmente a alterações do mercado, e ainda reduzirem os desperdícios, diminuir os danos que causam ao ambiente, e mais importante, garantir uma maior segurança para trabalhadores e equipamentos.

A nível da maquinagem, os produtos provenientes deste processo alcançaram uma melhoria considerável à medida que as máquinas-ferramenta evoluíam. Produtos com toleranciamentos apertados são mais facilmente obtidos recorrendo a *software* cada vez mais especializado. No entanto, a utilização dessas máquinas-ferramenta, nomeadamente as de Comando Numérico, torna-se dispendiosa, principalmente para pequenas séries. Isto leva a que peças com exigências dimensionais reduzidas sejam feitas manualmente ou por máquinas muito dedicadas. Assim, surgiu a necessidade de se encontrar uma solução flexível, mas no entanto, fiável para estas peças pouco exigentes a nível de toleranciamento e qualidade superficial. Os robôs industriais, devido às suas características, podem constituir uma solução para estes casos.

Segundo a *International Federation of Robotics* (<http://www.ifr.org>), as vendas de robôs industriais aumentaram 38% para as 166.028 unidades (Figura 1.1), durante o ano de 2011, sendo que a população mundial de robôs para uso industrial atingiu as 1.035.000 unidades [1].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

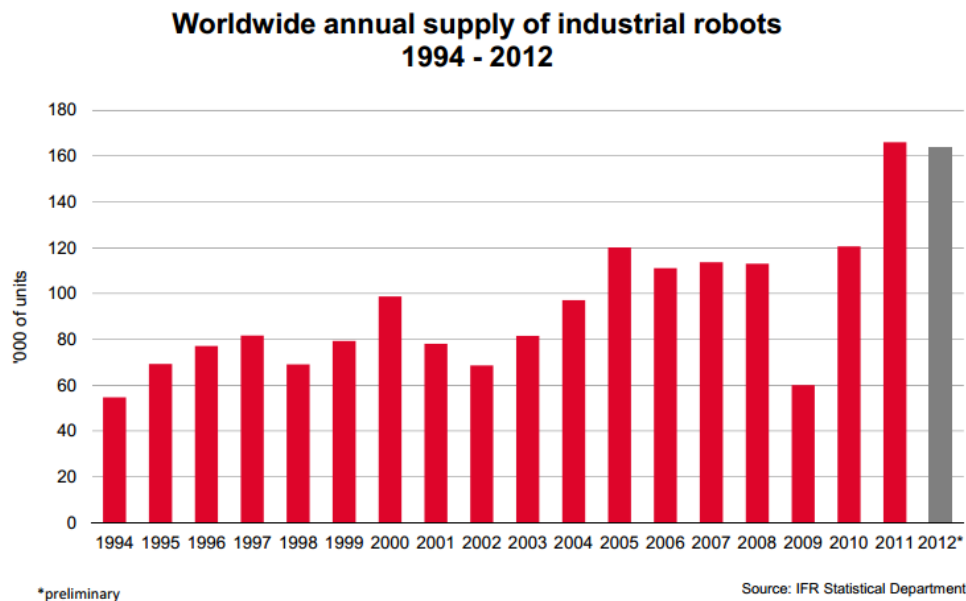


Figura 1.1 - Vendas mundiais de robôs de 1994 até 2012 [1].

Outro fator que ajuda a confirmar a grande flexibilidade destes equipamentos é a sua larguíssima gama de aplicações (Figura 1.2). Sendo certo que a Indústria Automóvel lidera a utilização de robôs industriais, com o manuseamento de materiais e a soldadura a ocupar uma grande fatia das aplicações [2].

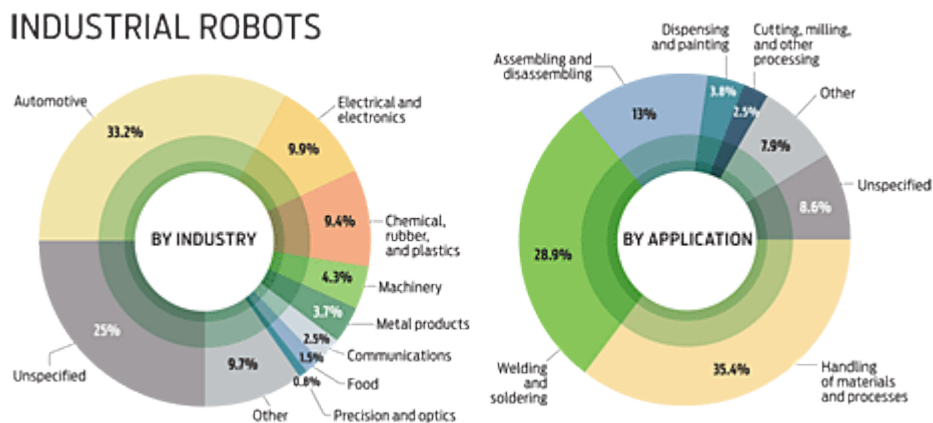


Figura 1.2 - Aplicações de robôs industriais por indústria e por aplicação [2].

No entanto, pode-se ver no gráfico da figura 1.2 que a utilização de robôs industriais em aplicações de maquinagem, como a fresagem, representa cerca de 2,5%, apesar de essa ser uma área em rápido crescimento. Acredita-se que os robôs possam substituir as máquinas de comando numérico em operações de baixa precisão dimensional devido ao seu elevado volume de trabalho, grande flexibilidade e baixo custo associado à sua utilização.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Por outro lado, os robôs apresentam três problemas que não lhes permitem substituir as máquinas-ferramenta em processos mais delicados:

1. Calibração do robô,
2. Vibrações e deformações associadas à sua baixa rigidez,
3. Programação de percursos de maquinagem e definição de configurações para estes.

Para fazer face a este terceiro ponto, várias marcas de robôs e distribuidoras de *software* têm apostado em soluções baseadas em *software* CAD/CAM. O seu funcionamento é idêntico aos programas utilizados para as máquinas-ferramenta (muitas vezes a solução vem como uma extensão do programa), podendo-se pós-processar os programas de Comando Numérico para a linguagem de programação dos robôs de diversas marcas.

É precisamente no estudo e análise dessas soluções que incide este trabalho.

1.1. Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar e aprofundar o conhecimento na área da programação *offline* de trajetórias de maquinagem recorrendo a *software* de CAD/CAM.

Para tal, recorreu-se à célula robótica que se encontra no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e aos *softwares* Mastercam®/RobotMaster® e RobotStudio® para a referida programação.

1.2. Organização dos temas abordados no relatório

Este relatório divide-se em 8 capítulos:

1. Um capítulo introdutório, em que o leitor pode ter uma noção da realidade do mundo da robótica industrial.
2. O capítulo 2 - *Maquinagem*, consiste numa pequena introdução ao tema da maquinagem em geral, para o leitor ter conhecimento básico sobre processos e as tecnologias associadas.
3. O capítulo 3 - *Robôs Industriais*, onde são abordados os equipamentos e a programação de robôs em geral.
4. O capítulo 4 - *Aplicação de robôs industriais em aplicações de maquinagem*, onde se faz um breve levantamento das tecnologias já

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

disponíveis no mercado, a nível de equipamento, de *software* e também de empresas que já as utilizam.

5. O capítulo 5 - *Configuração da célula robótica utilizada*, onde é exposta a configuração, modelação e calibração da célula robótica que foi utilizada neste trabalho.
6. O capítulo 6 - *Maquinagem em 3 eixos*, onde é descrito o procedimento para a realização de peças mais simples, em que o robô só se precisa de movimentar no espaço cartesiano.
7. O capítulo 7 - *Maquinagem em 5 eixos*, onde são efetuadas algumas peças de geometria mais complexa, que obrigam o robô a movimentar-se em 5 eixos.
8. E finalmente o capítulo 8 - *Conclusões e trabalhos futuros*, onde se descrevem as conclusões que surgiram deste trabalho e algumas sugestões sobre trabalhos que podem seguir-se.

Ainda se apresentam a Bibliografia e os Anexos no final.

2. Maquinagem

No mundo moderno, o fabrico de peças está cada vez mais desenvolvido. Existem diversos processos para se conceber essas peças: fundição, soldadura, conformação plástica e maquinagem. Este trabalho incidirá sobre este último, pelo que se segue uma pequena introdução ao tema.

2.1. Maquinagem e máquinas-ferramenta

Maquinagem é o termo geral usado para descrever o processo que consiste em remover material de uma peça de trabalho. Abrange variados tipos de operações que geralmente se dividem nas seguintes categorias [3]:

- Processos de corte, geralmente envolvendo ferramentas *single-point* (um único ponto de corte) ou *multipoint* (vários).
- Processos abrasivos, como a moagem.
- Processos não convencionais, utilizando fontes de energia elétrica ou química.

Em termos dos processos de corte é de destacar o Torneamento, a Furação e a Fresagem [4]. Todas estas operações são executadas em máquinas com características apropriadas a cada um deles, chamadas máquinas-ferramenta, sendo geralmente operadas por um operador especializado em cada processo. Atualmente, as máquinas-ferramentas são comandadas através de comando numérico computadorizado (CNC), que controlam os *drivers* dos motores, sistemas de segurança, meios de comunicação e até *software* de apoio a gestão e desenvolvimento do produto [5].

2.2. Fresagem

Fresagem é um processo de arranque de apara em que (ao contrário do torneamento) a ferramenta é animada de um movimento de rotação facultado por um motor alojado na árvore da máquina.

Sistemas de acionamento

Para os motores das árvores, o requisito principal é conseguir manter a sua potência constante ao longo de uma determinada gama de velocidades, geralmente entre 1000-12000 rpm (Figura 2.1). Estes motores são geralmente denominado de motores-árvore, ou “*spindles*”.

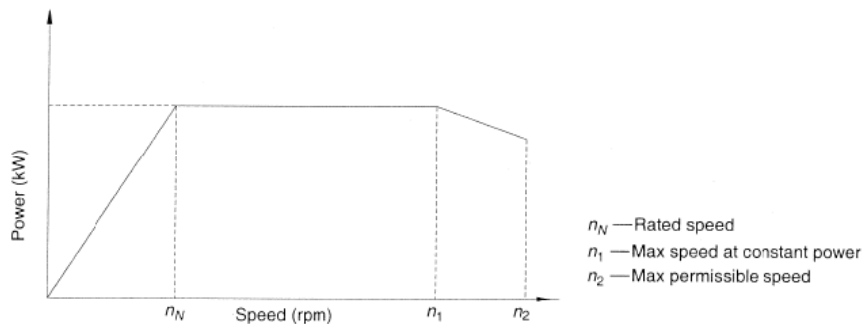


Figura 2.1 - Requisito de potência para um motor de árvore [6].

Para cumprir este requisito, normalmente utilizam-se motores DC de excitação separada ou motores de indução AC trifásicos [6].

Tipos de Fresagem

Pode dividir-se a operação de fresagem em dois tipos fundamentais (Figura 2.2): fresagem cilíndrica (*peripheral/slab milling*) e fresagem de topo (*face milling*) [7].

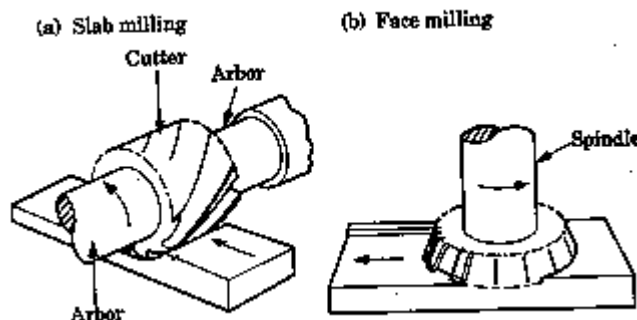


Figura 2.2 - Tipos de fresagem (a) cilíndrica (b) de topo [7].

Na fresagem cilíndrica, o eixo da ferramenta é paralelo à superfície a maquinar. Neste caso existem duas possibilidades (Figura 2.3): se o movimento de rotação da fresa é

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

contrário ao movimento de avanço, designa-se fresagem a “empurrar” (*up milling*). Este é o método *standard* visto que as forças de corte são mais baixas. Se se pretender uma taxa de remoção mais elevada deve-se optar pela fresagem a “puxar” (*down milling*), em que o sentido de rotação é o mesmo do sentido de avanço [8].

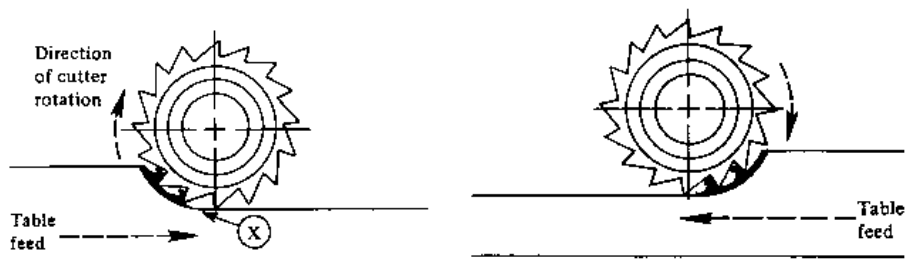
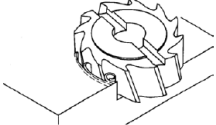
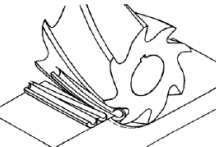
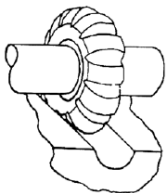
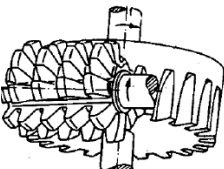


Figura 2.3 - Fresagem a "empurrar" (esquerda) e a "puxar" (direita) [8].

Na fresagem de topo, o eixo da fresa encontra-se perpendicular à superfície a maquinar, o que permite uma taxa de remoção cerca de 15 a 20% maior comparado à fresagem cilíndrica e é executada em fresadoras verticais, ao contrário da fresagem cilíndrica (executada em fresadoras horizontais) [9].

Existem ainda outros tipos de fresagem (Tabela 1).

Tabela 1 - Tipos de fresagem [10].

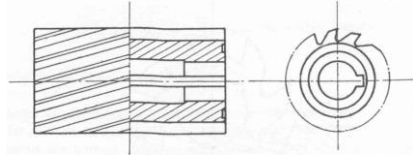

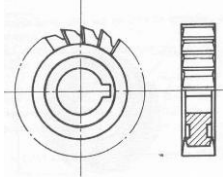
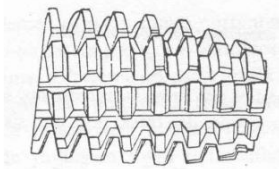
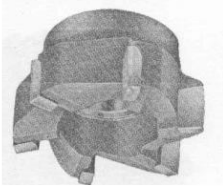
Fresagem plana	
Fresagem circular	
Fresagem de forma	
Fresagem de geração	

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Tipos de fresas

Para cada operação de fresagem, existe uma fresa apropriada (Tabela 2), a fresa pode ser feita de vários materiais, como aço rápido ou com revestimento de, por exemplo, tungsténio.

Tabela 2 - Tipos de fresa [10].

Fresa de corte simples ou fresa cilíndrica	
Fresa de corte duplo ou fresa frontal	
Fresa de corte triplo ou fresa de três cortes	
Fresa de perfil constante	
Fresa de dentes amovíveis	

Quanto às navalhas de corte, estas podem ser direitas ou helicoidais (Figura 2.4).

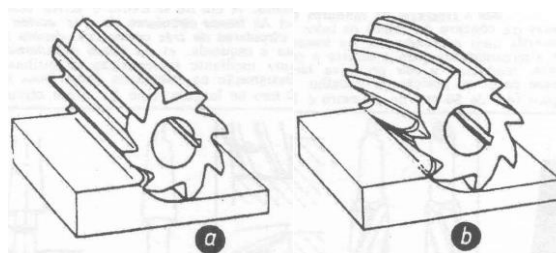


Figura 2.4 - Disposição das navalhas de uma fresa. Direitas (à esquerda) e helicoidais (à direita) [10].

2.3. Comando Numérico Computadorizado

O comando numérico (NC) consiste em operar uma determinada máquina através de instruções codificadas em forma de números, letras e símbolos, que a unidade de controlo da máquina (MCU) consiga “entender”. Essas instruções correspondem a determinadas distâncias, posições, funções ou movimentos [11].

Quando este controlo é efetuado por um computador denomina-se Controlo Numérico Computadorizado (CNC). A tecnologia CNC surgiu no final da década de 40 no MIT. As características disponibilizadas por esta tecnologia são [12]:

- Possibilidade de armazenar o programa na memória e utilizá-lo várias vezes.
- Possibilidade de edição e otimização do programa no próprio controlador da máquina.
- Existência de rotinas *standard*, p.e., para furação, que podem ser usados como sub-programas.
- Simulação e visualização do programa na consola do controlador.
- Detecção de colisões.
- Compensação do desgaste de ferramentas.
- Obtenção de informação que pode ser usada no planeamento de produção.

A Tabela 3 apresenta as vantagens e desvantagens do CNC.

Tabela 3 - Vantagens e Desvantagens do CNC [12]

Vantagens	Desvantagens
Eliminação do erro do operador	Investimento inicial avultado
Libertação do operador para outras funções	Custo de manutenção elevado
Baixo custo de trabalho	Necessidade de pessoal mais especializado
Redução do <i>work-in-progress</i>	Aumento do trabalho preparatório
Aumento do tempo de vida de ferramenta	
Flexibilidade na alteração do desenho	
Redução da inspeção	
<i>Scheduling</i> e previsão de custos mais precisos	

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Fica então evidente que as vantagens desta tecnologia ultrapassam largamente as desvantagens, daí a sua ampla utilização atualmente, em detrimento de técnicas manuais.

Hoje em dia começam-se a integrar os equipamentos que utilizam o CNC em sistemas de gestão e supervisão, que permitem uma flexibilidade ainda maior e uma gestão de custos e de tempo mais eficiente.

Um sistema CNC normalmente tem o esquema da Figura 2.5, sendo os seus constituintes um módulo de comando numérico, que pode ter comunicação com o exterior (Internet, Ethernet, USB, Comunicação série...), os drivers dos motores, os motores (normalmente servomotores) e os sensores e transdutores.

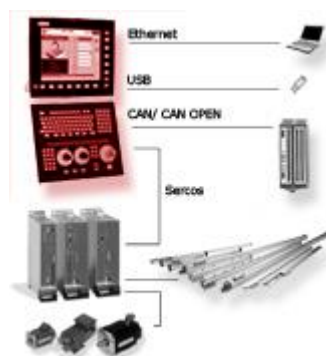


Figura 2.5 - Esquema de um sistema CNC [13].

O módulo de comando numérico (NC) é constituído por 3 componentes (Figura 2.6):

- *Man-Machine Interface* (MMI), que tem funções de monitorização e alarme, edição e modificação de programas e funções auxiliares.
- Núcleo do Comando Numérico (*Numerical Control Kernel* - NCK), responsável pela interpretação do programa NC, interpolação e geração dos perfis de velocidade e controlo de posição.
- Controlador Lógico Programável (PLC), que se ocupa do controlo sequencial (troca de ferramentas, velocidade de árvore, mudança da peça a maquinar...), do processamento de sinais de I/O e pelo controlo do funcionamento da máquina, exceto do sistema de acionamento dos eixos. [6]

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

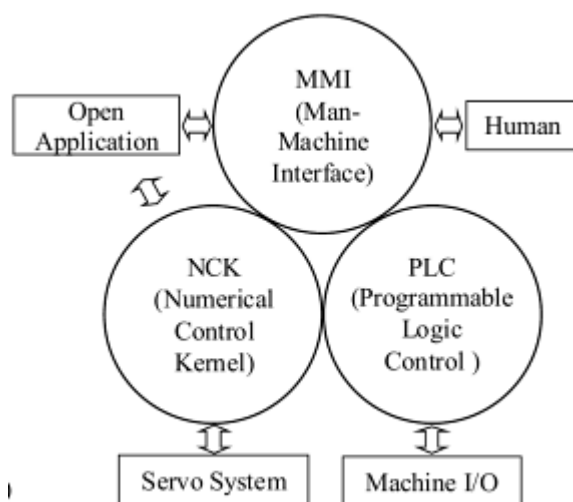


Figura 2.6 - Componentes de um módulo CNC [14].

No que diz respeito às linguagens de programação, a maioria das máquinas CNC ainda utiliza a chamada linguagem de códigos G, ou seja, seguindo a norma ISO 6983/1. Essa linguagem não é completamente universal, pelo que cada máquina tem os seus próprios códigos G. Então, para tentar uniformizar a linguagem de programação de máquinas CNC, foi criada a norma ISO 10303, mais concretamente o protocolo STEP AP 238, ou STEP-NC.

A Figura 2.7 ilustra as diferenças entre as 2 tecnologias.



Figura 2.7 - Diferenças entre as normas ISO 6893 e STEP-NC [15].

O STEP-NC surge com o objetivo de suprir as seguintes necessidades:

- Permitir o uso direto dos modelos de informação na norma STEP.
- Criar um modelo de informação centrado na peça a trabalhar.
- Usar linguagens uniformizadas e atuais.
- Eliminação de pós-processadores.
- Possibilidade de as alterações poderem ser reenviadas para CAD.
- Redução do número de desenhos entre CAD e CAM.

Sendo esta uma tecnologia recente, ainda há um número pequeno de equipamentos que a incorporam na sua programação, sendo esta a sua maior desvantagem [6].

2.4. Maquinagem de alta velocidade (HSM)

A maquinagem de alta velocidade (*High Speed Machining* – HSM) é um conceito trazido por Carl Solomon no ano de 1931, que pressupõe que um aumento de cerca de 5 a 10 vezes da velocidade de maquinagem traria uma diminuição da temperatura na interface peça-ferramenta [16]. Isto acontece porque a velocidade de avanço também pode aumentar e assim ser superior a velocidade de condução térmica.

A Figura 2.8 mostra o efeito da velocidade de maquinagem com na temperatura da apara removida.

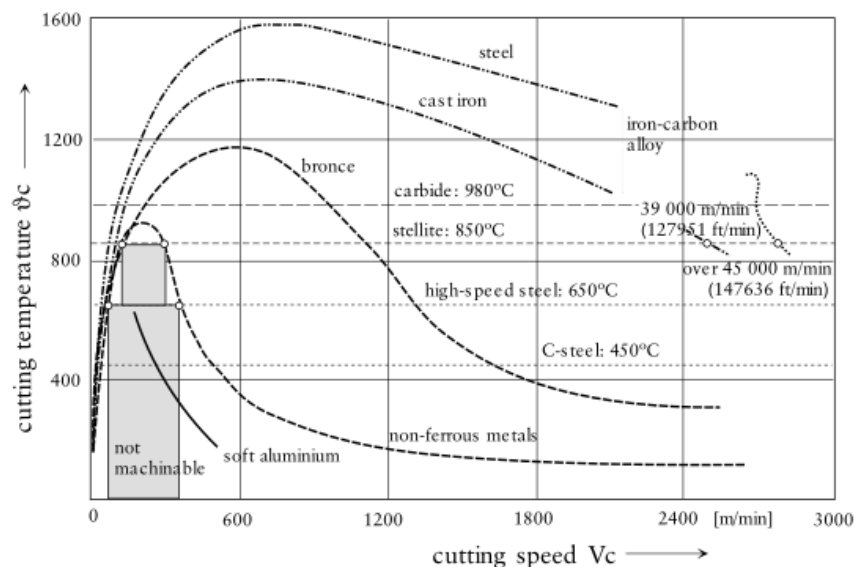


Figura 2.8 - Efeito da velocidade de maquinagem na temperatura da apara removida [17].

Esta forma de maquinagem tem a desvantagem óbvia de tornar as máquinas-ferramenta mais dispendiosas, pois necessita de motores-árvore mais poderosos, bem como ferramentas mais caras (geralmente com núcleo de carbonitreto de Titânio - TiCN, e óxido de Alumínio - Al_2O_3) e que tem um tempo de vida mais baixo. No entanto, estas desvantagens claramente ultrapassadas pelas vantagens deste processo:

- Aumento da taxa de remoção de material,
- Qualidade superficial superior,
- Diminuição da força de corte [17].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A Figura 2.9 ajuda a traduz graficamente a influência da velocidade nesses fatores.

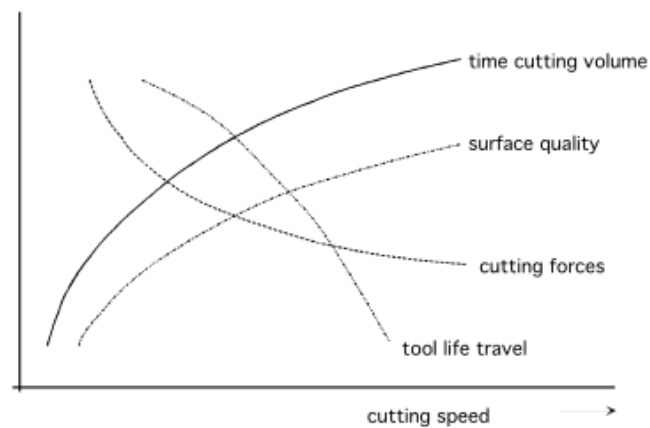


Figura 2.9 - Influência da velocidade em vários fatores da maquinagem [17].

2.5. Parâmetros importantes

Passo (*Stepover*)

O passo (Figura 2.10) pode ser definido como a distância que uma ferramenta se desloca entre as faixas de percurso adjacentes. Este parâmetro determina se uma superfície é mais ou menos macia. Recomenda-se um *stepover* de aproximadamente 70% do diâmetro da fresa [18].

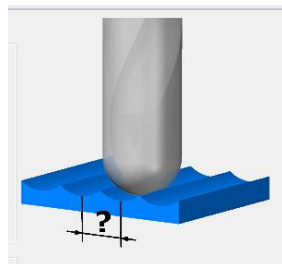


Figura 2.10 - Passo de uma operação de maquinagem.

Stepdown

Stepdown é a distância que a ferramenta percorre, normalmente em profundidade, entre duas passagem consecutivas. Determina a profundidade de corte em cada passagem.

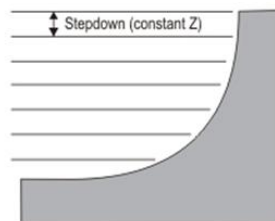


Figura 2.11 - Definição de *stepdown* em maquinagem

3. Robôs Industriais

Segundo a norma ISO 8373, um robô industrial é um manipulador controlado em posição, reprogramável e multifuncional, que tem um ou vários graus de liberdade, capaz de manipular materiais, peças, ferramentas, ou dispositivos especializados através de movimentos programados para o desempenho de variadas funções.

Tipicamente, os robôs¹ têm a aparência de braço(s) que terminam num “pulso” que contém o atuador/manipulador e são usados para funções repetitivas, sendo comandados por um controlador, podendo ter elementos de sensorização.

A configuração típica de um robô inclui, além do atuador e do controlador, uma interface com o utilizador, normalmente uma consola de programação (Figura 3.1).

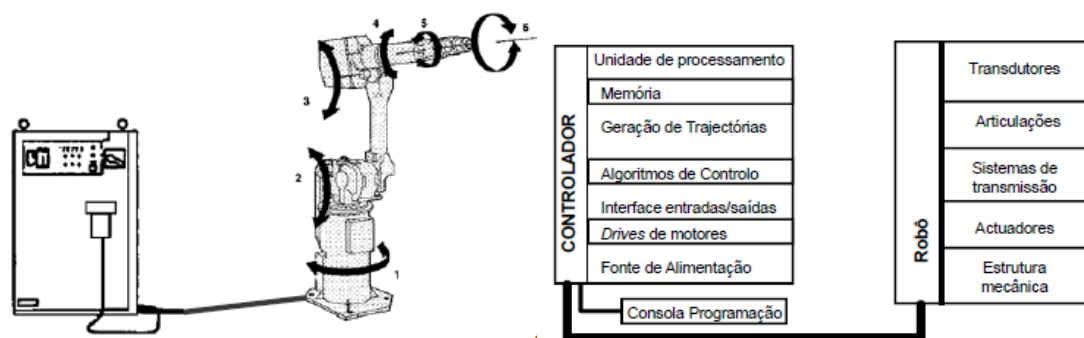


Figura 3.1 - Configuração típica de um robô industrial.

¹ Neste relatório, a designação de robô refere-se a robôs industriais

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Em termos de estruturas, existem 2 grandes grupos de robôs (Figura 3.2):

- Estrutura em série
- Estrutura em paralelo

A configuração em série consiste numa série de corpos rígidos, ligados em série através de juntas (prismáticas ou rotativas) que terminam numa extremidade livre em que se podem acoplar ferramentas, garras e até sensores.

Numa estrutura em paralelo, existem 2 plataformas, uma fixa e uma móvel, ligadas por duas ou mais cadeias cinemáticas independentes. Esta configuração tem a vantagem de ser mais rígida e de ter uma velocidade de atuação maior, mas perde em termos de espaço de trabalho.



Figura 3.2 - Robô de estrutura em série (à esquerda) e de estrutura em paralelo (à direita).

Sendo os robôs industriais cada vez mais utilizados, e cada vez em mais aplicações, o fabrico destes equipamentos é um negócio em expansão, onde se destacam alguns construtores, não só pelo número de robôs vendidos, mas pela qualidade dos seus produtos e serviços de manutenção.

3.1. Principais fabricantes

Esta secção permitirá o leitor ter um conhecimento dos principais fabricantes de robôs industriais que atualmente lideram o mercado.

ABB

O grupo ABB é uma sociedade multinacional, atualmente sediada em Zurich, na Suíça, e opera na área da Automação e da Energia. Em 2012, a empresa atuava em mais de 100 países (Figura 3.3) e empregava mais de 145.000 trabalhadores [19].

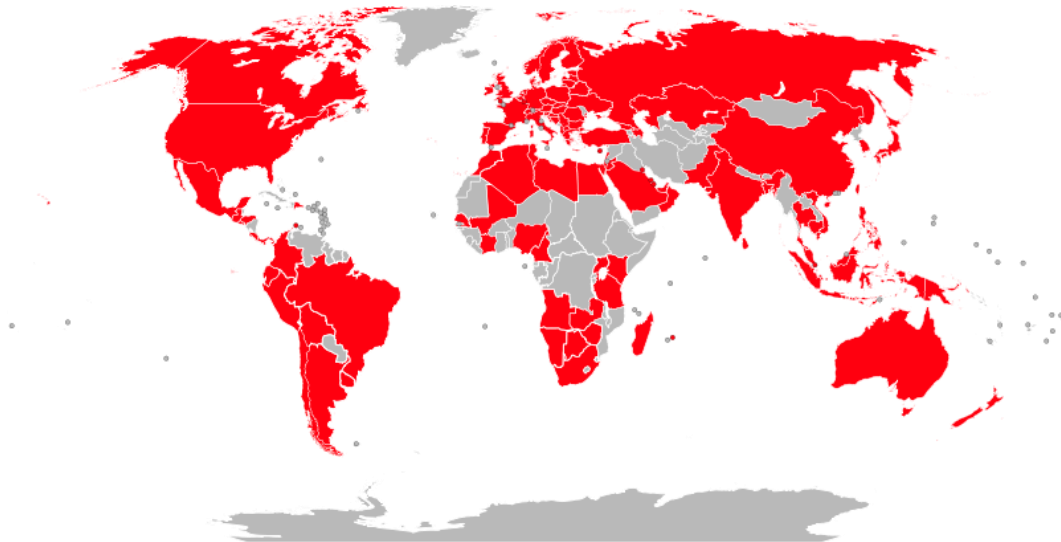


Figura 3.3 - Países em que a ABB está presente [15].

A empresa surgiu da fusão de duas outras, a ASEA, uma empresa sueca que atuava no mercado dos geradores e energia elétrica, e da empresa suíça *Brown, Boveri & Cie*, que produzia motores AC e DC, geradores, turbinas a vapor e a gás e componentes para locomotivas.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Na área da robótica, a ASEA foi a construtora do primeiro robô industrial de atuação elétrica e controlado por micro-processador, usando o primeiro *chipset* Intel. O robô em questão denomina-se ASEA IRB6 (Figura 3.4), possui 5 eixos de movimento e uma capacidade de carga de 6 kg, tendo sido desenvolvido entre 1972-73.



Figura 3.4 - ASEA IRB6, o primeiro robô industrial [19].

Este robô foi desenvolvido para aplicações de polimento em situações adversas para operadores humanos, sendo que o primeiro robô vendido foi utilizado para polir e encerar tubos de aço inoxidável dobrados a 90°.

Fanuc

Fanuc é a abreviatura para *Fujitsu Automated Numerical Control*, uma empresa sediada em Oshino, Japão, especializada na Indústria do Controlo Numérico e na área da Robótica Industrial. A empresa teve a sua origem como parte da *Fujitsu*, desenvolvendo sistemas de CN e servomecanismos. Em 1972 tornou-se independente. Atualmente emprega cerca de 5.000 pessoas e opera em 22 países [20].

A empresa oferece produtos e serviços na área das máquinas de controlo numérico computadorizado, servomotores, tecnologia laser e uma ampla gama de robôs industriais (Figura 3.5).

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

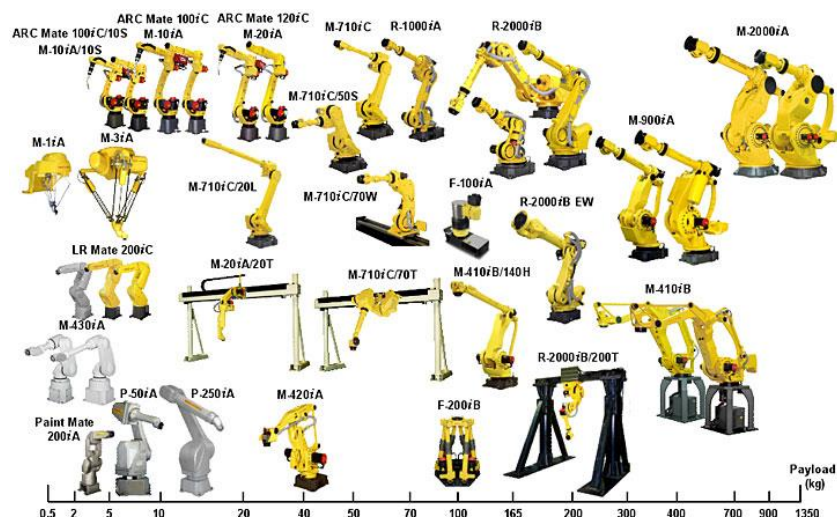


Figura 3.5 - Gama de robôs da marca Fanuc [20].

A marca distingue-se pela sua cor amarela e o símbolo máximo da sua capacidade de produção é a sua instalação fabril no monte Fuji (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Complexo fabril da Fanuc no monte Fuji [20].

KUKA

KUKA (*Keller und Knappich Augsburg*) é uma empresa alemã que produz soluções para a automação industrial.

A empresa foi fundada em 1898 em Augsburg, Alemanha, por Johann Josef Keller e Jacob Knappich. Nos seus primórdios, a empresa dedicava-se à iluminação pública e de casas. Mais tarde começou a produzir equipamentos de soldadura e em 1966 era líder do mercado em veículos públicos.

Em 1973, a empresa criou o seu primeiro robô industrial, o FAMULUS. Em 1976 criam uma linha de robôs com 6 eixos eletromecânicos e em 2007 entra para o Guinness Book ao construir o maior e mais forte robô industrial do mundo.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Atualmente emprega 3.150 empregos e opera nas seguintes áreas:

- Transportes;
- Indústria alimentar;
- Construção;
- Indústria do vidro;
- Fundição;
- Processamento de pedra e metal.

A nível de curiosidade, em 2001 a KUKA desenvolveu o Robotcoaster (Figura 3.7), um robô que simula o movimento de uma montanha russa.

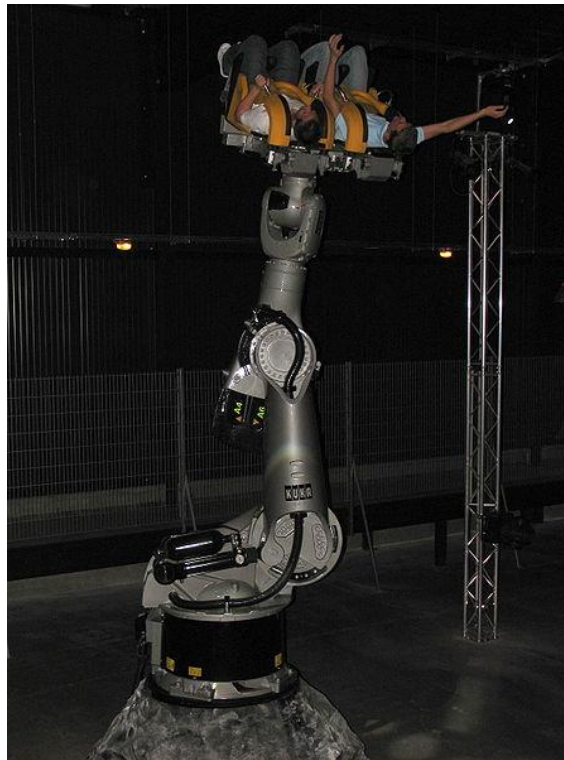


Figura 3.7 – O Robotcoastear.

3.2. Programação de robôs

A programação de robôs envolve a definição de trajetórias/ações que o robô deve efetuar. Existem dois métodos para a programação de robôs industriais: *online* e *offline*.

3.2.1. Programação *online*

Este método de programação consiste em “ensinar” os pontos ao robô através da movimentação do próprio robô. Este método obriga à paragem do funcionamento do robô, visto que implica uma interação direta entre o utilizador e o robô, ou seja, existe uma quebra de produtividade quando usado este método, além de que não está garantida a segurança do operador, pois este pode não conseguir estar fora do alcance do robô durante todo o processo de programação. No entanto, não é necessário comprar algum *software* adicional para a programação de trajetórias.

A movimentação do robô pode ser feita por *manual leadtrought* (Figura 3.8), em que o programador guia o elemento terminal até à posição desejada, memorizando depois essa posição.



Figura 3.8 - Programação através de *manual leadthrought* [21].

Outra forma de realizar esta operação é através da consola de programação, em que o utilizador pode definir em que referencial ou eixo quer movimentar o robô até à posição pretendida, memorizando assim os pontos desejados. Por exemplo, o utilizador pode movimentar o robô alterando o valor de cada eixo, ou então movê-lo no espaço cartesiano.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A Figura 3.9 mostra algumas consolas de programação de diferentes fabricantes.



Figura 3.9 - Exemplo de consolas de programação de diferentes fabricantes [21].

O guiamento até aos pontos tem de ser complementado por uma programação textual onde é definido o tipo de movimento a utilizar, o tipo de interpolação a implementar entre os pontos ensinados, as velocidades pretendidas e toda a interação necessária para acomodar a realização das tarefas a programar [21].

Cada fabricante de robôs possui a sua linguagem de programação, a Tabela 4 apresenta a linguagem utilizada por cada fabricante, e os controladores em que ela é suportada.

Tabela 4 - Linguagem de programação de diferentes fabricantes.

Fabricante	Linguagem	Controlador
ABB	RAPID	SC4, IRC5
Fanuc	Karel	RG, RJ-3
Motoman	INFORM II	XRC 2001
KUKA	KRL	KRC

A programação *online* é bastante útil quando é preciso executar trajetórias complexas como na aplicação de colas ou sprays, daí a sua grande aplicação em operações de pintura.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

3.2.2. Programação *offline*

Ao contrário da programação *online*, este método não implica uma interação direta com o robô. Isto traduz-se num aumento de produtividade visto que não se tem de parar o robô para a sua programação.

A programação *offline* consiste em introduzir as linhas de código com as instruções de movimentação numa linguagem específica para cada robô, recorrendo a *software* específico. Porém, esta metodologia não é prática pois não é possível obter-se uma visualização do processo, o que pode acarretar erros na movimentação e até colisões do robô com elementos da célula, ou até entre elos do próprio robô.

Assim, devido ao avanço a nível do *software*, surgiram novos programas com ferramentas de simulação gráfica (Figura 3.10). Estes programas oferecem a possibilidade de movimentar o robô num ambiente virtual, gerar o programa e verificá-lo através de uma simulação gráfica, contornando os problemas referidos anteriormente.

A evolução destes programas permitiu que sejam cada vez mais amigos do utilizador, possuindo ferramentas de deteção de colisões e de *add-ons* para determinadas aplicações.

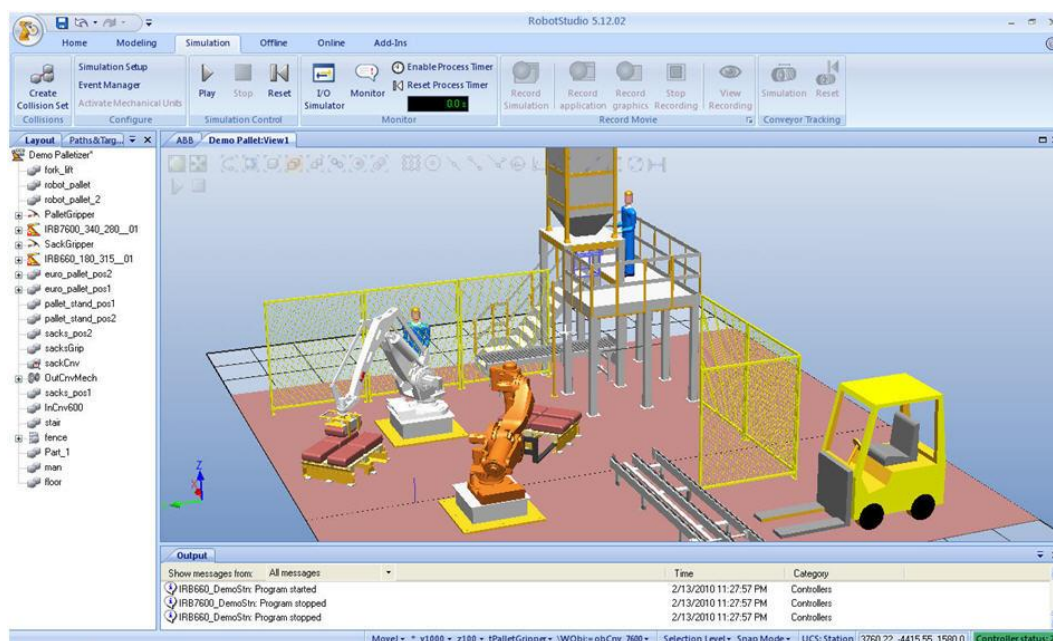


Figura 3.10 - Exemplo de um *software* de programação *offline* de robôs.

Com a crescente popularidade destes programas, a maioria dos fabricantes decidiu disponibilizar um para a sua marca de robôs. A Tabela 5 apresenta uma lista de *software* de programação *offline* de alguns fabricantes.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Tabela 5 - *Software* de programação *offline* de diferentes fabricantes.

Fabricante	<i>Software</i>
ABB	RobotStudio®
Fanuc	Robotguide
Motoman	MotoSim EG
KUKA	KUKA SIM

No entanto, também existem programas mais genéricos que possibilitam trabalhar com diferentes marcas de robôs. A Tabela 6 apresenta uma lista de *software* “genérico” para programação *offline* de robôs, bem como o seu fabricante e as marcas compatíveis.

Tabela 6 - *Software* de programação *offline* genérico.

Fabricante	<i>Software</i>	Marcas Compatíveis
WAT Solutions	<i>Workspace</i>	ABB, Fanuc, Mitsubishi, Mitsubishi, Motoman, Kawasaki, Kuka, Panasonic, Siemens
Camelot Robotics	Ropsim	ABB, Motoman, KUKA
Compucraft Ltd.	RobotWorks	FANUC, ABB, Kawasaki, Motoman, KUKA, Staubli

3.2.3. RobotStudio® da ABB

O programa de programação *offline* da marca ABB é o RobotStudio®. Este *software* foi escolhido para este trabalho visto que o robô presente no laboratório de robótica é, precisamente, dessa marca.

A ABB descreve este programa como sendo uma ferramenta de *true offline programming*, ou seja, disponibiliza um *software* que é uma cópia do controlador real, chamado RobotWare, com o qual o RobotStudio® é sincronizado. Isto garante que o controlador virtual corresponde fielmente ao real. Assim, as simulações efetuadas no RobotStudio® são muito mais realistas.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

O RobotStudio® é um programa que funciona em ambiente virtual, e com possibilidade de alteração do código RAPID (Figura 3.11).

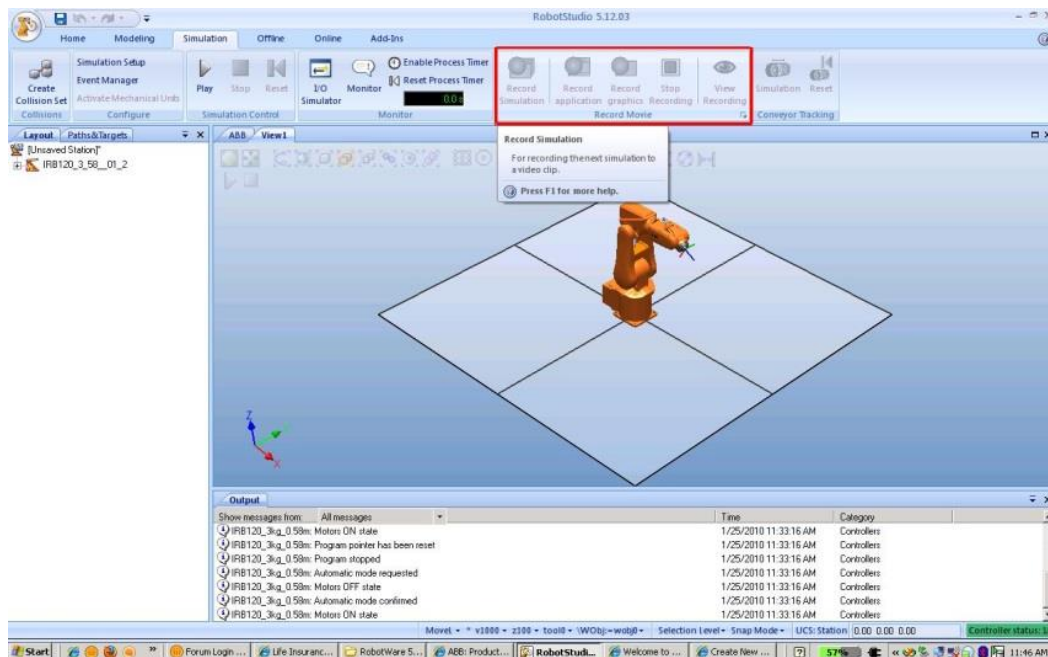


Figura 3.11 - Ambiente virtual no programa RobotStudio® da ABB [19].

Este programa oferece bastantes funcionalidades, entre elas:

- Importação de ficheiros CAD;
- Geração automática de trajetórias e configurações;
- Otimização de trajetórias (indicando possíveis pontos de singularidade);
- Verificação de alcance;
- Verificação tridimensional das trajetórias programadas;
- Detecção de colisões;
- *Screen Recorder*, gravação das simulações;
- Possibilidade de criação de interfaces através do *Microsoft Visual Studio Tools for Applications*;
- Verificação da aplicabilidade do programa na célula real;
- *MultiMove*, controlo de vários robôs virtuais em simultâneo.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Outra característica importante é o *Virtual FlexPendant* (Figura 3.12), uma consola virtual em tudo idêntica à consola de programação do controlador. Esta funcionalidade permite assim conferir um maior realismo à aplicação.

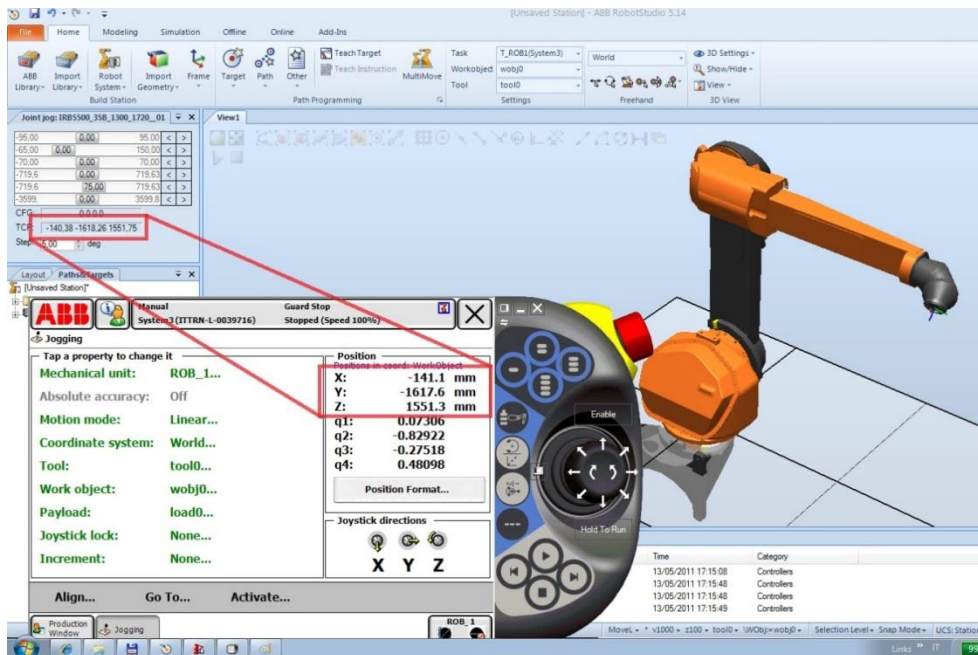


Figura 3.12 - Virtual FlexPendant do RobotStudio® da ABB [19].

Além destas possibilidades de série, o RobotStudio® tem ao dispor do utilizador uma série de expansões denominadas de *PowerPacs* para aplicações mais específicas, tais como:

- *ArcWelding PowerPac*, para aplicações de soldadura;
- *Machining PowerPac*, para operações de maquinagem;
- *Bending PowerPac*, para operações de quinagem;
- *Painting PowerPac*, para operações de pintura;
- *Cutting PowerPac*, para aplicações de corte;

O RobotStudio® rege-se por uma hierarquia de sistemas de coordenadas (Figura 3.13), em que cada um deles é definido em relação ao referencial que lhe é imediatamente superior [22].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

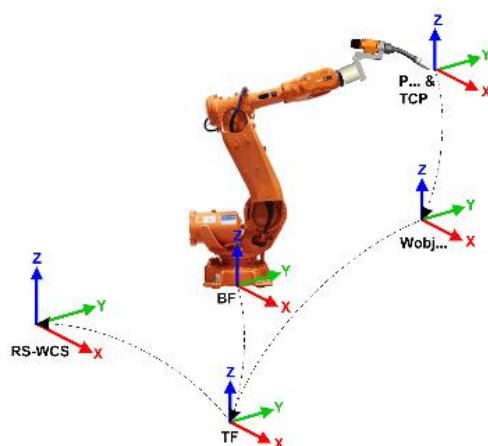


Figura 3.13 - Hierarquia dos sistemas de coordenadas do RobotStudio® [22].

A hierarquia encontra-se definida da seguinte forma:

- *World Coordinate System*, é o sistema de coordenadas que se encontra no topo da hierarquia, sendo que este é a base de toda a estação de trabalho, sendo todos os outros definidos a partir deste (mesmo quando existe mais que um robô na célula de trabalho).
- *Task Frame*, sistema de coordenadas da tarefa, é utilizado para a coordenação do posicionamento dos elementos que integram uma estação de trabalho que utilize múltiplos robôs e mecanismos. Um sistema de coordenadas de tarefa permite coordenar o posicionamento relativo de diversos mecanismos que executam uma tarefa comum, enquanto vários sistemas de coordenadas de tarefas são utilizados quando se pretende trabalhar com várias tarefas independentes.
- *Base Frame*, é o sistema de coordenadas da base de cada robô.
- *Tool Frame*, representa o sistema de coordenadas da ferramenta, também referido com TCP, *tool center point*, no entanto, este também apresenta uma orientação dos eixos da ferramenta. O TCP definido por defeito encontra-se no elemento terminal do robô e tem a designação de *tool0*.
- *Workobject Frame*, é o sistema de coordenadas que representa a posição do objecto de trabalho. Este pode ser independente ou estar solidário com qualquer mecanismo. Os pontos ensinados ao robô são normalmente definidos em relação a um *workobject*.

Outro ponto importante deste *software* é o conceito de configuração dos eixos. Um robô pode atingir um determinado ponto de várias formas distintas, em que a posição dos diferentes eixos é diferente [22].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

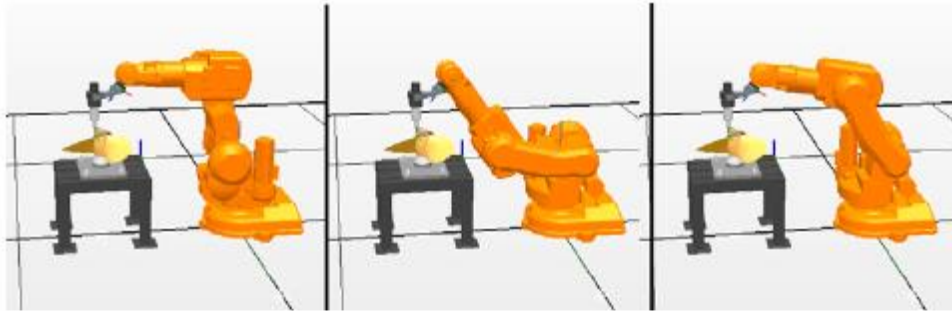


Figura 3.14 - Robô no mesmo ponto com configurações diferentes [22].

A configuração de eixos de um robô é especificada por uma série de quatro algarismos inteiros, que identifica a localização do valor angular dos eixos principais num de quatro quadrantes correspondentes a uma rotação completa. Por exemplo, o valor [0;-1; 2; 1] tem o significado representado abaixo:

- O primeiro valor inteiro (0) especifica a posição do primeiro eixo: algures no 1º quadrante positivo (entre 0 e 90 graus).
- O segundo valor inteiro (-1) especifica a posição do eixo 4: algures no primeiro quadrante negativo (entre 0 e -90 graus).
- O terceiro valor inteiro (2) especifica a posição do eixo 6: algures no 3º quadrante positivo (entre 180 e 270 graus).
- O quarto valor inteiro (1) especifica a posição de um eixo X, um eixo virtual, utilizado para definir o centro do punho relativamente aos outros eixos.

4. Aplicação de robôs industriais em aplicações de maquinagem

Existem disponíveis no mercado, atualmente, algumas soluções dedicadas à maquinagem com robôs. Neste capítulo é feita uma exposição de algumas destas soluções.

4.1. Robôs para operações de maquinagem

Algumas empresas de robôs têm investido em novos equipamentos dedicados a operações de maquinagem. Seguem-se alguns exemplos.

ABB 6660 205/1,9

Este robô foi desenvolvido pela ABB a pensar particularmente em operações de pré-maquinagem, pelo que é um robô consideravelmente pesado (1910 kg), o que faz com que a sua rigidez seja mais alta e que as vibrações sejam bastante mais pequenas. A sua repetibilidade tem um valor aproximado de 0,07mm [23].

No entanto, o IRB 6660 tem um volume de trabalho mais pequeno que os robôs convencionais (Figura 4.1).

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

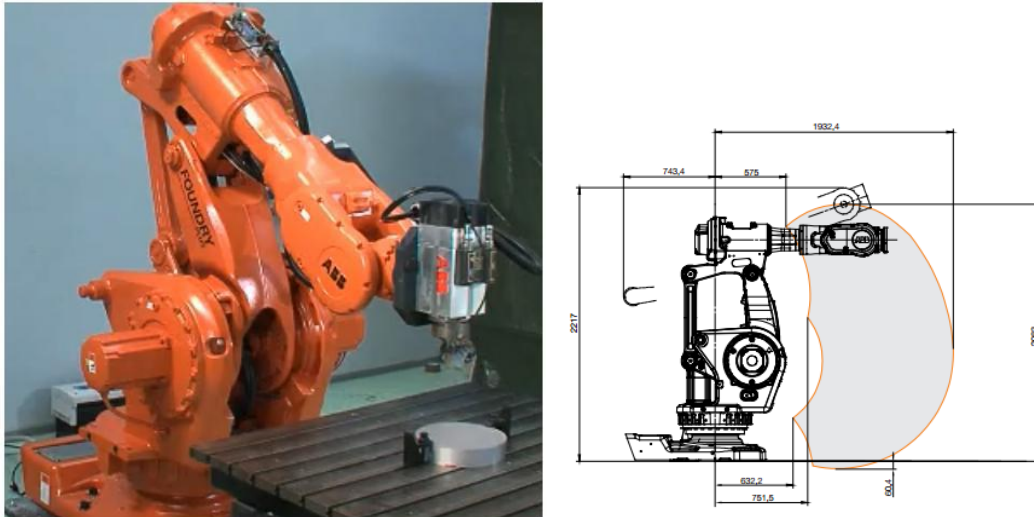


Figura 4.1 - Robô ABB 6660 205/1.9 (esquerda) e o seu respetivo volume de trabalho [23].

Este robô pode vir equipado com motor-árvore, se o cliente assim o desejar. Esta solução é do tipo chave na mão e inclui também o driver do motor, as ligações e o *software* que permite o controlo do *spindle* através do FlexPendant (Figura 4.2).

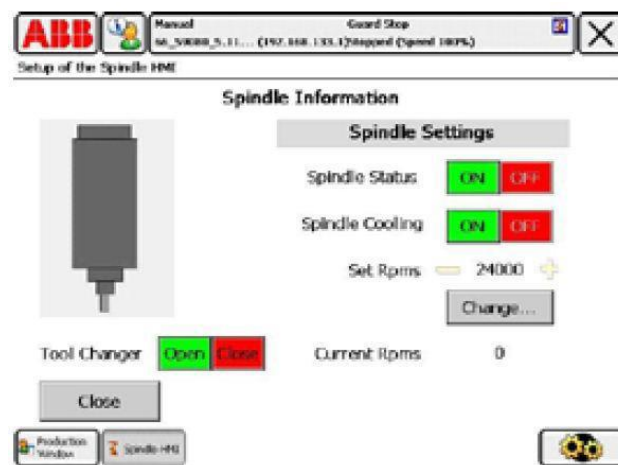


Figura 4.2 - Menu de controlo do *Spindle* no FlexPendant da ABB [23].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Fanuc F-200iB

Este robô desenvolvido pela Fanuc (Figura 4.3) apresenta uma estrutura paralela com 6 atuadores idênticos, o que lhe confere desde logo uma rigidez excecional. Tem 6 graus de liberdade e foi desenvolvido para operações de remoção de material e de soldadura, tendo uma repetibilidade de 0,1mm [24].



Figura 4.3 - Robô Fanuc F-200iB [24].

KUKA KR 500-3 MT

A KUKA desenvolveu este robô (Figura 4.4) com o objetivo de obter um equipamento com uma rigidez superior, sem perder na sua repetibilidade ($\pm 0,08\text{mm}$). Sendo um robô que pesa 2400kg, isso facilita o aumento da rigidez. O KR 500-3 MT também é ideal para transportar cargas pesadas devido a sua capacidade de vencer forças de até 8.000N [25].



Figura 4.4 - Robô KUKA KR 500-3 MT [25].

Stäubli RX 170 HSM

Este robô foi criado a pensar em operações de *High Speed Machining*, tem 5 eixos e vem com o motor-árvore integrado, sendo que todas a ligações, quer elétricas, mas também de lubrificação e arrefecimento passam por dentro do braço do robô (Figura 4.5).

Com uma repetibilidade de +/- 0,04mm, o RX 170 HSM pode maquinar vários tipos de materiais, deste alumínio a madeira e espumas [26].



Figura 4.5 - Robô Stäubli RX 170 HSM [26].

Com este robô existe ainda uma gama de motores-árvore que o cliente pode escolher (A Figura 4.6 ilustra essas três opções).


			
TYPE	PRECISE SD5084	FISCHER MFM1224/42	FISCHER MFM1224
Rotation speed (rpm)	500 to 20 000	2 000 to 42 000	2 000 to 24 000
Power (KW) - Torque (N.m)	8	17	17
Diameter (mm)	80	120	120
Attachment	HSK E 32	HSK A/C 40	HSK A/C 40
Cooling	Air Water	Air Water	Air Water
Lubrication	Grease	Air/Oil	Grease

Figura 4.6 - Oferta de motores-árvore para o RX 170 HSM [26].

4.2. *Software* para operações de maquinagem com robôs

Com a crescente utilização de robôs em aplicações de maquinagem, surgiu a necessidade de existirem programas específicos para estas aplicações.

A filosofia destes *softwares* baseia-se em programas de CAM (*Computer Aided Manufacturing*) para máquinas de CNC, estando a diferença no facto de poderem pós-processar o programa NC gerado para uma linguagem que possa ser lida pelo robô.

Isto elimina a dificuldade de gerar trajetórias complexas em programas de programação *offline* de robôs.

Atualmente, os fabricantes de robôs já disponibilizam extensões aos seus programas dedicadas a este tipo de aplicações. No entanto, encontram-se no mercado *softwares* específicos para maquinagem com robôs, bem como *add-ons* para programas de CAD/CAM para este efeito.

PowerMill/ PowerMill Robot Interface

O PowerlMill é um programa criado pela empresa DELCAM, empresa fundada em 1977 e que se dedica à distribuição de *software* CAD/CAM. É um programa dedicado à programação de trajetórias de ferramentas para 2, 3 ou 5 eixos.

As possibilidades deste programa incluem:

- Ferramentas de CAD 3D para modelação de objetos tridimensionais;
- Simulação do percurso da ferramenta;
- Visualização da remoção de material durante o processo de maquinagem [18].

A sua interface dedicada à maquinagem com robôs denomina-se PowerMill Robot Interface e é compatível com as marcas mais populares como KUKA, ABB, Fanuc, Motoman e Staübli. Tem a possibilidade de comandar células robóticas com até 8 eixos, lineares ou rotativos.

O método de execução com este programa encontra-se na Figura 4.7.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

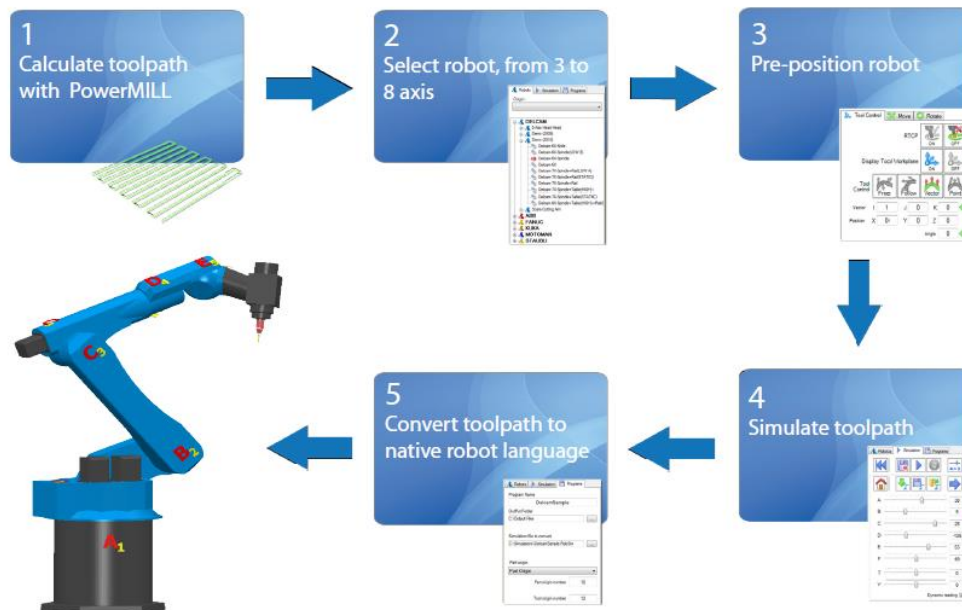


Figura 4.7 - Método de execução com o PowerMill Robot Interface [28].

Mastercam®/RobotMaster®

O *software* Mastercam® (www.Mastercam.com) é um programa de CAD/CAM. Foi desenvolvido pela CNC Software Inc., empresa criada em 1983, sendo umas das empresas mais antigas neste ramo [20].

Sendo o produto do seu género mais vendido no mundo [30], este *software* divide-se em níveis de funcionalidades e *add-ons*, sendo estes:

- Design ;
- Mill Entry;
- Mill, Level 1;
- Mill, Level 2;
- Mill, Level 3;
- 5-Axis *add-on*;
- Lathe Entry;
- Lathe, Level 1;
- Router Entry;
- Router;
- Router Plus;
- Router Pro;
- Wire;
- Art.

Cada nível destes inclui certas funcionalidades, consoante a necessidade do utilizador.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Uma das possibilidades do Mastercam® é a criação de modelos CAD em 2D ou 3D (Figura 4.8), bem como o seu dimensionamento e a importação/exportação de modelos não-Mastercam®, por exemplo, modelos SolidWorks® ou AutoCAD.

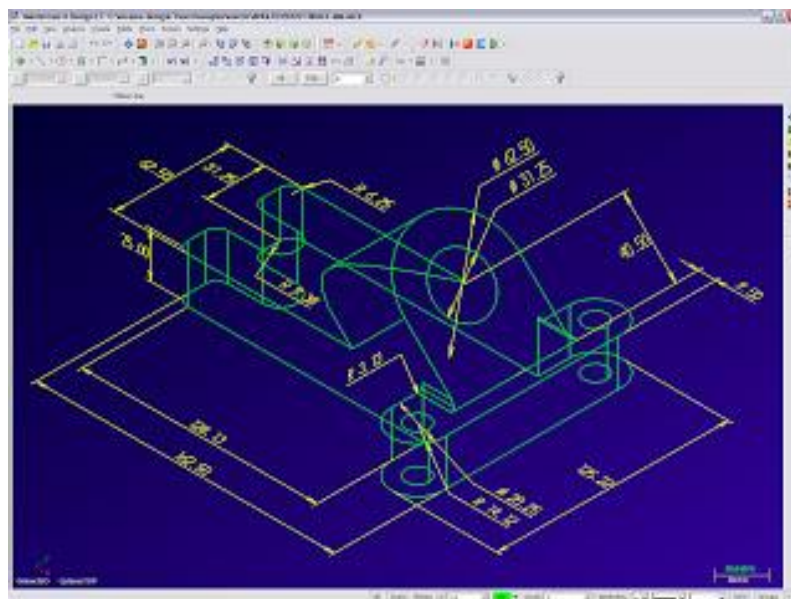


Figura 4.8 - Ferramenta de CAD do Mastecam [31].

A nível da criação de trajetórias de maquinagem (Figura 4.9), este *software* oferece módulos para fresadoras, tornos, máquinas de eletroerosão, máquinas multi-eixos, módulos específicos para trabalhar em madeira e para arte, sendo que em cada um deles existe uma variedade de operações como desbaste, acabamento, furação, contorno, facejamento, etc.

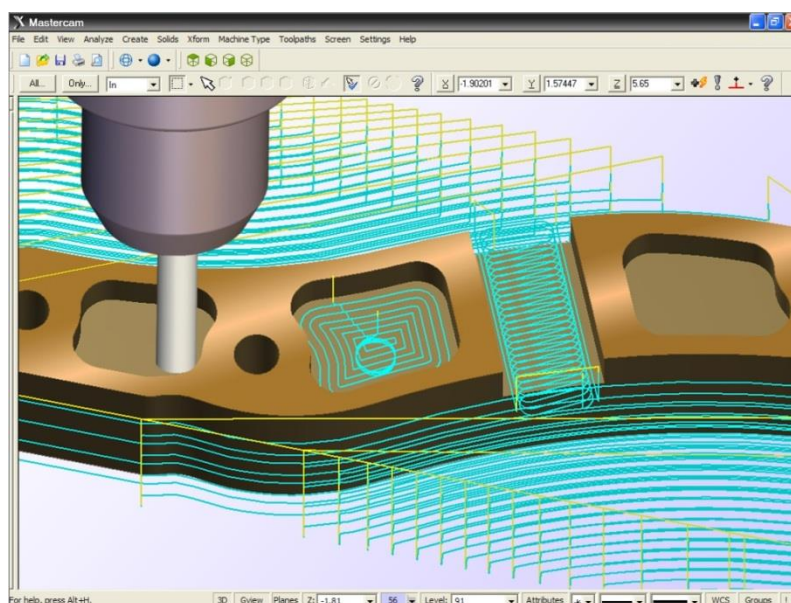


Figura 4.9 - Criação de um *toolpath* (linhas a azul) no Mastercam® [32].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Este programa oferece ainda a possibilidade de simulação do percurso em ambiente virtual (Figura 4.10). Esta funcionalidade permite não só visualizar a peça e a ferramenta, bem como a máquina escolhida e detetar possíveis colisões.

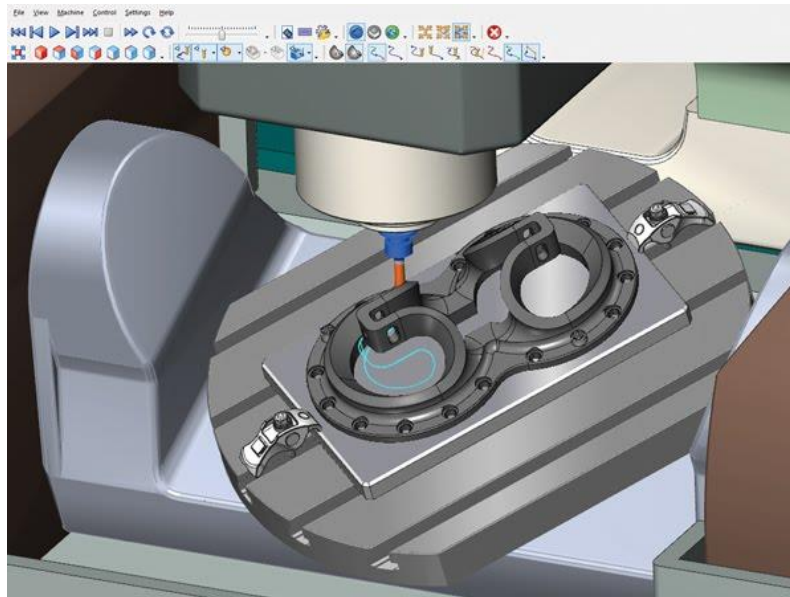


Figura 4.10 - Ambiente de simulação no Mastercam® [33].

A nível da criação de programas NC, o Mastercam® oferece uma série de pós-processadores, havendo a possibilidade de expansão, através da inclusão de novos pós-processadores para outras máquinas. O *software* gera um programa NC que pode ser exportado para vários formatos (Figura 4.11).

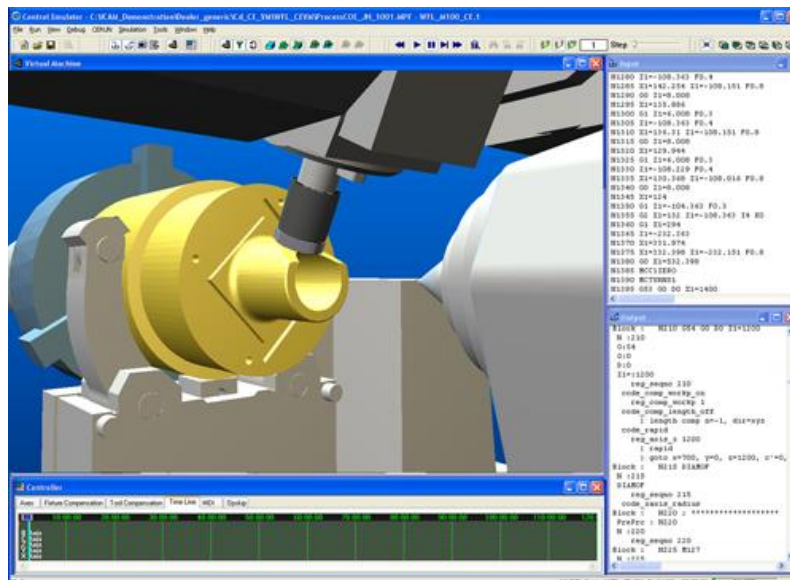


Figura 4.11 - Exemplo de programa NC criado no Mastercam® (à direita) [34].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

O *add-on* que permite a integração de robôs no processo de maquinagem denomina-se RobotMaster® (www.RobotMaster.com). Com ele o utilizador tem a opção de escolher entre várias marcas de robôs (ABB, Fanuc, Motoman, KUKA, Staübli...). Além disso, o utilizador tem a liberdade para escolher os seguintes parâmetros:

- Robô e ferramenta a usar;
- *User frame* e *tool center point*;
- Parâmetros de movimento (velocidade, zona...);
- Adição de um eixo externo (rotativo ou linear);
- Divisão do programa criado em sub-programas.

Entre os *features* encontrados no RobotMaster®, destacam-se dois: o *Workspace* e o *Optimization*.

No *Workspace*, o utilizador consegue visualizar todo o espaço de trabalho do robô, bem como a posição da peça a maquinar e dos *toolpath* adotados, podendo assim ajustar estes parâmetros. Na Figura 4.12 pode visualizar-se o espaço de trabalho do robô, bem como a trajetória do TCP (a azul) e do elemento terminal do robô (a verde), bem como a posição da origem do referencial da peça (à direita).

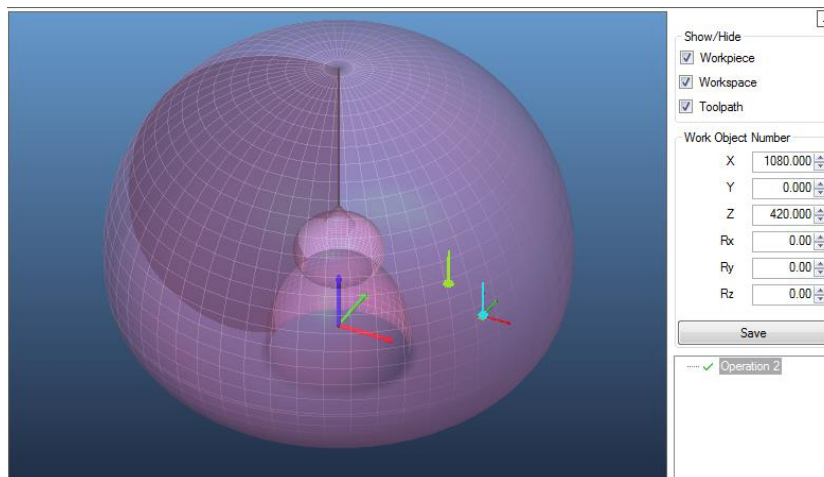


Figura 4.12 - Opção Worspace no RobotMaster®.

Na opção *Optimization*, é possível ajustar a orientação da ferramenta em relação à peça. Isto traduz-se num ecrã onde aparecem várias zonas representativas dos problemas encontrados na execução da trajetória (singularidades, limites de junta, zonas fora da área de trabalho, colisões...) e uma linha que o utilizador pode ajustar para fazer cumprir as suas necessidades. Na Figura 4.13 está representado um exemplo desta opção. Podem-se visualizar duas zonas (amarelo e castanho) e a linha sobre os -90°. Os restantes problemas que poderiam surgir estão representados pelas suas cores à direita.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

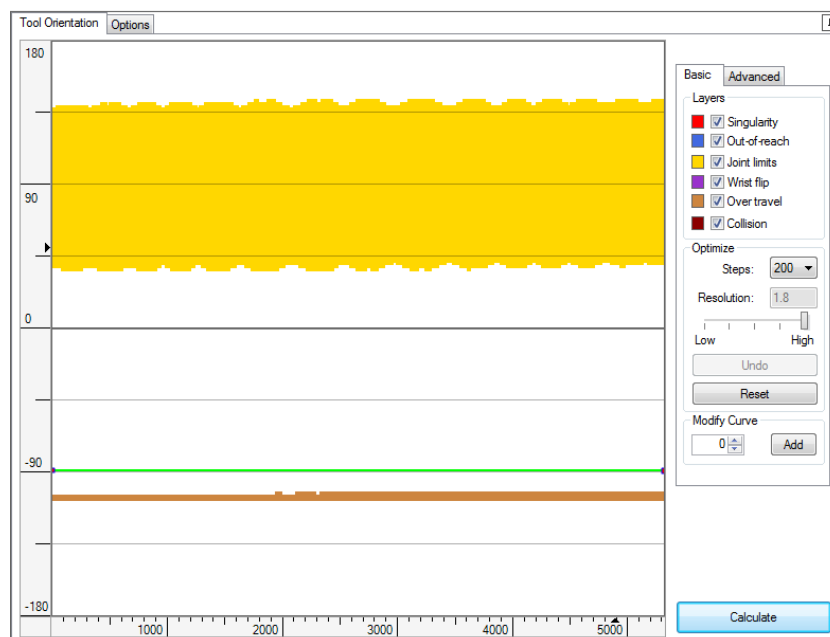


Figura 4.13 - Funcionalidades básicas de *Optimization* no RobotMaster®.

Esta função também oferece opções avançadas como a limitação dos valores que podem atingir as juntas. Na Figura 4.13 vê-se que a junta 5 está limitada entre os -90° e os 90° (à direita), isto quer dizer que a linha deve estar dentro da zona vermelha, sendo as zonas cinzentas a evitar.

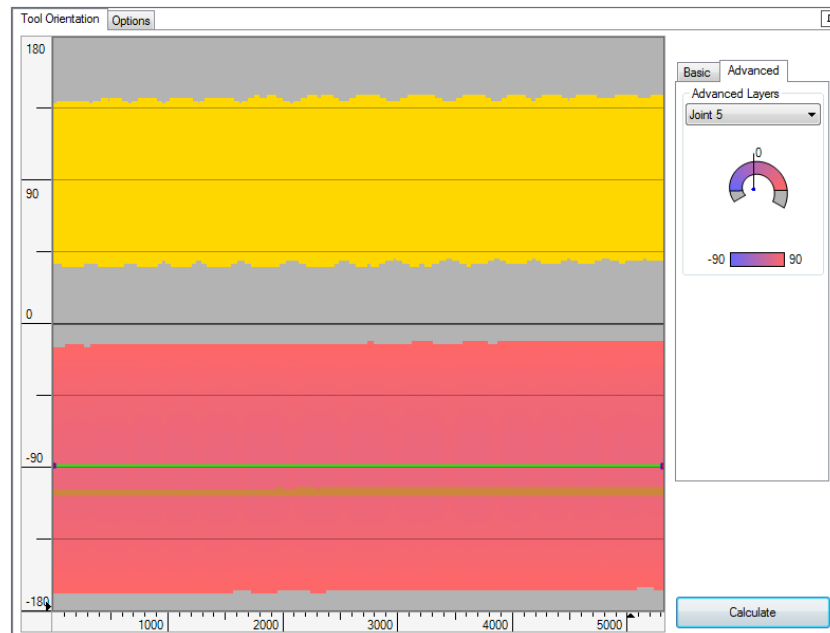


Figura 4.14 - Opções avançadas de *Optimization* no RobotMaster®.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

RobotStudio® Machining PowerPac

O *software* de programação *offline* da ABB, o RobotStudio® (Secção 3.2.3 deste relatório) oferece uma solução orientada para maquinagem, o *Machining PowerPac*. Sendo este um *add-on* ao programa, é completamente compatível e integra-se perfeitamente.

Esta aplicação permite a importação de modelos CAD e gerar automaticamente trajetórias a partir desse modelo, tornando assim o processo de programação *offline* mais expedito e simples.

Entre as estratégias de controlo de trajetória encontram-se três por definição: *NormalProcess* e duas com recurso a controlo de força, o *FCPressureProcess*, em que as forças de contacto são medidas e a trajetória alterada de modo a exercer uma força constante (Figura 4.15), e o *FCSpeedChangeProcess*, em que a velocidade é alterada consoante a leitura das forças de contacto (Figura 4.16).

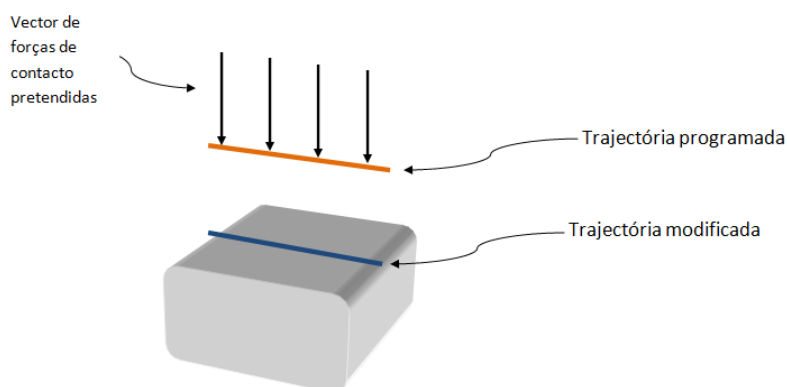


Figura 4.15 - Esquema representativo do *FCPressureProcess* da ABB [35].

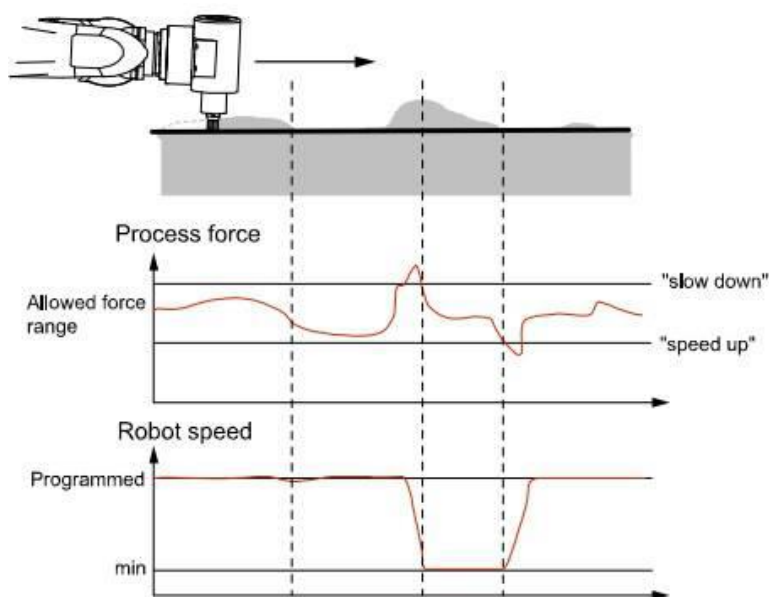


Figura 4.16 - Esquema representativo do *FCSpeedChangeProcess* da ABB [35].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

O *Machining PowerPac* oferece uma metodologia própria para a geração da trajetória. Trata-se de um *wizard* (Figura 4.17) que se divide em sete passos bastante intuitivos. São eles:

1. Definição da solução de maquinagem;
2. Definição das superfícies de maquinagem;
3. Definição dos parâmetros do processo de maquinagem;
4. Definição da ferramenta e dos referenciais de trabalho;
5. Tipo de geração da trajetória;
6. Definição da orientação da trajetória;
7. Pré visualização da trajetória.



Figura 4.17 - Wizard do Machining PowerPac da ABB

4.3. Aplicações existentes no mercado

Esta secção apresenta uma breve referência a empresas que, neste momento, utilizam robôs industriais para operações de maquinagem, sendo que o campo de aplicações é vastíssimo. Uma breve descrição dessas empresas apresenta-se de seguida.

Johnsons Wellfield Quarries

Empresa de produção de artigos esculpidos em pedra (Figura 4.18), fundada em 1854, decidiu modernizar o seu processo de produção de modo a conseguir manter-se líder de mercado neste campo. Após pesquisa, decidiram que a maquinagem da pedra recorrendo a robôs industriais seria uma boa solução.

Atualmente dispõe de três células robóticas que integram robôs Staübli RX270, e utilizam o programa Mastercam®/RobotMaster®. Esta solução permitiu à empresa reduzir os riscos para os operadores e aumentar a sua produção significativamente [36].



Figura 4.18 - Escultura produzida pela Johnsons Wellfield Quarries [36].

Garner Holt Productions

Empresa que opera na área do entretenimento, nomeadamente na produção de figuras animadas para, por exemplo, parques de diversões ou casinos (Figura 4.19). Para isto, utiliza um digitalizador tridimensional a laser para obter um modelo da peça a produzir. Tendo este modelo, a peça é produzida através de um robô da marca KUKA, e uma mesa rotativa. O *software* que utilizam é o PowerMill.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico



Figura 4.19 - Célula robótica da Garner Holt Productions [37].

Simtech Systems

Esta empresa finlandesa desenvolve soluções de *software* para controlar robôs industriais. Recentemente, desenvolveu uma solução para fabricar moldes em areia em conjunto com a Mühlbauer Maschinenbau, empresa que fornece soluções robóticas integradas, e a Audi, construtor automóvel.

O método consiste em gerar o molde como um modelo CAD, e usar um robô para maquinar diretamente o molde. Este processo designa-se de *patternless casting* [38].

Tal processo é possível devido a dois *softwares*:

- *ConiferCast* – utilizado para simular o processo de vazamento do metal no molde;
- *ConiferRob* – para otimizar as trajetórias efetuadas pelo robô.



Figura 4.20 - Maquinagem de um molde para a Audi. Processo desenvolvido pela Simtech Systems [39].

Aesculap

A Aesculap faz parte do grupo B. Braun Melsungen AG, e dedica-se a produzir próteses médicas. A empresa tem ao seu dispor dois robôs KUKA KR 30 HÁ que são utilizados para operações de lixagem e acabamento das próteses da anca (Figura 4.21). A adoção desta tecnologia permitiu à empresa produzir próteses com uma qualidade superficial

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

bastante superior e num tempo mais baixo, aumentando assim a sua capacidade de produção [30].

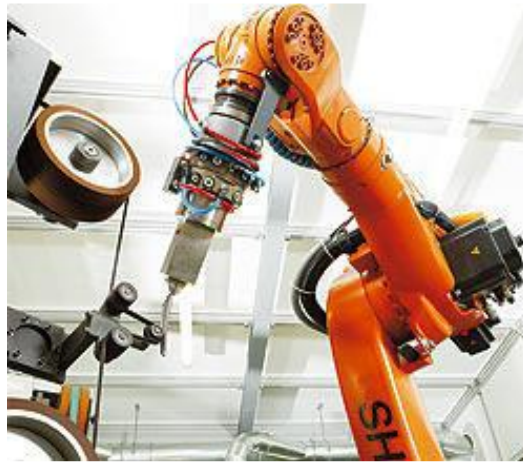


Figura 4.21 - Robô KUKA a lixar uma prótese ortopédica Aesculap [40].

Tromes Design

Empresa australiana que trabalha com materiais compósitos, resinas e espumas. Tem como clientes a indústria aeronáutica, automobilística e desportos radicais, criando, por exemplo, pranchas de surf (Figura 4.22).

A necessidade de acelerar todo o processo de desenho, criação de um protótipo, do molde e da peça final, levou a empresa a adotar sistemas robóticos da marca Motoman, e os programas Rhinos 3.0 (CAD) e PowerMill para fazer face ao problema.



Figura 4.22 - Maquinagem de uma prancha de surf na Tromes Design [41].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

5. Configuração da célula robótica utilizada

Este capítulo será dedicado à configuração da célula robótica real e das células robóticas virtuais nos programas RobotStudio® e RobotMaster®. Esta configuração é essencial pois as células virtuais devem corresponder o mais fielmente possível à célula real.

5.1. Célula robótica real

Esta célula é constituída pelos seguintes elementos:

- Robô Industrial ABB 2400/16;
- Controlador ABB IRC5;
- Mesa posicionadora IRPB C-500 da ABB;
- Célula de carga ATI Delta IP60;
- Sistema pneumático de mudança rápida de ferramenta SCHUNK SWS-011;
- *Spindle* PDC XLC70, com sistema de mudança automática de ferramenta;
- Controlador do *spindle*.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

ABB 2400/16

Segundo o *site* da ABB, este é o robô industrial mais popular do mundo (Figura 5.1). Esta popularidade deve-se à sua fiabilidade, que se traduz num tempo médio entre manutenções bastante alargado, à sua velocidade elevada, excelente repetibilidade (RP= 0,06mm), e ainda a sua capacidade de carga de 20kg e um alcance até 1,810m [42].

Este modelo apresenta uma estrutura de 6 eixos rotativos em série. As suas características apresentam-se mais detalhadas no *datasheet* retirado da página do robô no *website* da ABB, que será apresentado em anexo. [Anexo A]



Figura 5.1 - Robô Industrial ABB IRB 2400/16 [42].

Entre as aplicações deste robô destacam-se:

- Soldadura por arco elétrico;
- Rebarbagem;
- Aplicação de colas/vedantes;
- Polimento;
- Manuseamento de máquinas/cargas.

O robô encontra-se montado em cima de uma base para melhor aproveitar o seu volume de trabalho.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Controlador IRC5

Este controlador constitui a 5ª geração de controladores da marca ABB (Figura 5.2). Sendo este um sistema modular, o utilizador pode acrescentar novos eixos, ou até novos robôs.



Figura 5.2 - Controlador ABB IRC5 [43].

Existem 3 modos para controlar o robô:

- Manual a velocidade máxima;
- Manual a velocidade reduzida;
- Automático.

Para os dois primeiros modos, o controlo é feito a partir de um *FlexPendant*, ou seja, uma consola de programação com ecrã tátil, *joystick* com 3 eixos de movimentação e possibilidade de personalizar a interação com o utilizador, p.e., a criação de menus para determinadas tarefas.

O controlo do movimento é feito de 3 modos: *TrueMove*, *QuickMove* e *MultiMove*. O modo *TrueMove* permite ao robô efetuar a trajetória com o máximo de precisão possível.

QuickMove habilita o robô de efetuar trajetórias com o máximo de velocidade possível, através de modelações dinâmicas avançadas, só disponíveis com este controlador.

Ainda existe a opção de *MultiMove*, que possibilita a utilização de até 4 robôs conjuntamente, ou até 36 eixos externos, devido à sincronização de padrões de movimento complexos.

Para uma melhor visualização das capacidades deste controlador, recomenda-se os vídeos presentes no *website* da ABB sobre este tema.
<http://www.abb.com/product/seitp327/f0cec80774b0b3c9c1256fda00409c2c.aspx>

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Informações mais detalhadas sobre este controlador estão presentes no *datasheet* obtido no site da ABB, que estão apresentadas em anexo. [Anexo B]

Mesa posicionadora ABB IRPB C-500

Esta é uma mesa posicionadora rotativa, que tem uma repetibilidade no seu movimento de 0,05mm e uma capacidade de carga até 500kg, no entanto, a diferença entre as cargas dos dois lados da mesa não pode exceder os 350kg. Sendo do mesmo fabricante que o controlador, a sua integração neste torna-se bastante facilitada.



Figura 5.3 - Mesa posicionadora ABB IRPB C-500 [44].

O ecrã preto visto na Figura 5.3, serve para, não só, realizar operações separadas em ambos os lados da mesa, mas também para proteger o utilizador de, p.e., poeiras ou radiações provenientes de processos de soldadura. No entanto, esse ecrã não está montado na célula real.

Mais informações serão apresentadas em anexo, no *datasheet* retirado do *website* da ABB. [Anexo C].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Célula de Carga ATI Delta IP60

Este sensor é produzido pela ATI Industrial Automation (Figura 5.4), uma empresa dedicada a produzir componentes para robôs industriais. É vendido pela ABB como uma solução chave na mão, ou seja, pronto a utilizar.

A célula de carga é do modelo SI-330-30, consegue medir até três forças (até 330 N para F_x e F_y e 990 N para F_z) e três Binários (30 Nm para T_x , T_y e T_z), tendo uma resolução de 1/16N para F_x e F_y , 1/8N para F_z e 5/1333 Nm para T_x , T_y e T_z . A sua frequência de ressonância ronda os 1100 Hz, tendo como dimensões 130mm de diâmetro e 1.81 kg de peso.

Segundo o fabricante, este componente é o ideal para trabalhar em ambiente com poeiras, visto ser construído com peças em aço inoxidável de alta resistência e uma distorção de ruído muito próxima de zero [18].



Figura 5.4 - Sensor de Força ATI Delta IP60 [45].

A aplicação de sensores de força em robôs é relativamente recente, pelo que os componentes ainda são bastante caros e a integração com *software* é ainda difícil. No entanto é bastante útil para aplicações de lixagem ou rebarbagem de superfícies não uniformes e mais recentemente, furação de superfícies não uniformes.

Este componente vem com uma flange protetora, o que limita a junta 5 a um movimento de [-90; +90], de modo a não haver colisões entre esta e o robô.

Sistema pneumático de mudança rápida de ferramenta SCHUNK SWS-011

Trata-se de um sistema de mudança rápida de ferramenta de funcionamento pneumático e controlado pelo controlador através de entradas de I/O (Figura 5.5). Este mecanismo tem limitações a nível dos binários máximos a que pode ser sujeito.



Figura 5.5 - Sistema de mudança de ferramenta Schunk SWS-011 [46].

***Spindle* PDC XLC70**

Este é um *spindle* (motor-árvore) da marca Precision Drive Systems destinado a aplicações de maquinagem de alta velocidade (HSM) (Figura 5.6). Tem uma potência de 2.2 kW, podendo atingir velocidades de 40000 rpm a uma frequência de 667 Hz, com um peso de aproximadamente 10 kg (Figura 5.6).

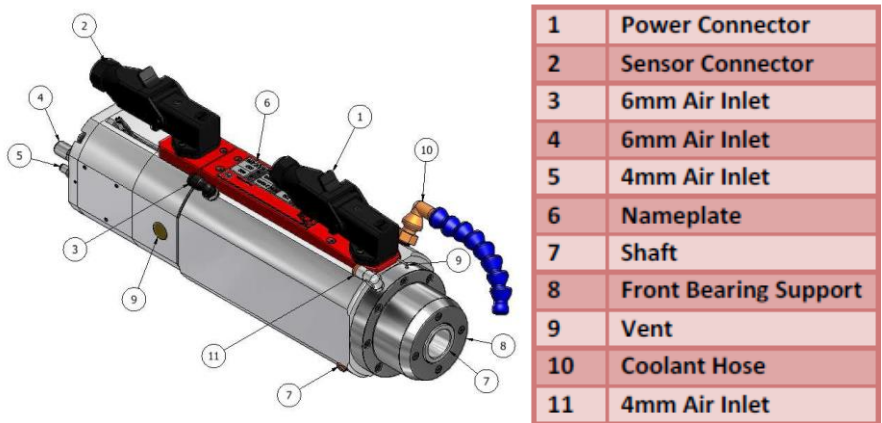


Figura 5.6 - *Spindle* PDC XLC70.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Este componente vem equipado com uma série de sensores como:

- 4 Sensores de proximidade;
- 2 Sensores de temperatura.

Quanto à gama de materiais, a Tabela 7 apresenta uma série de famílias de materiais disponíveis para maquinagem com este *spindle*.

Tabela 7 - Gama de materiais maquináveis pelo *spindle* XLC70 [47].

Titânio e ligas resistentes térmicas	Não adequado
Ligas de Aço Níquel	Não adequado
Aço inoxidável (série 300)	Não adequado
Aço inoxidável (série 400)	Não adequado
Aço-Carbono	Não adequado
Aço macio	Não adequado
Granito e Mármore	Usar com precaução
Alumínio e ligas leves	Usar com precaução
Madeiras duras, Carvalho	Usar com precaução
Madeira compensada e OSB	Uso normal
Madeiras leves, pinho, abeto, vidoeiro	Uso normal
Plástico flexível e PVC	Uso normal
MDF (Medium Density Fiberboard)	Uso normal
Placa de partícula	Uso normal
Espuma rígida (plástico vitrificado)	Uso normal

5.2. Célula robótica virtual

De modo a conseguir uma maior eficiência e realismo na simulação dos processos de maquinagem nos *softwares* RobotStudio® e Mastercam®/RobotMaster®, foi preciso configurar as células nestes dois programas de maneira a haver uma correspondência entre estas e a célula robótica real.

Para tal foi utilizado um computador equipado com um processador Intel® Core™ i5, a funcionar com uma frequência de 3.20 GHz, 4 GB de memória RAM e o sistema operativo Windows® 7 de 64 bit.

Modelação dos componentes acoplados ao elemento terminal

O primeiro passo seria modelar os componentes num programa de modelação, neste caso, foi utilizado o *software* SolidWorks® versão Educacional 2012, da Dassault Systèmes. O modelo do *spindle* XLC70 apresenta-se na Figura 5.7.

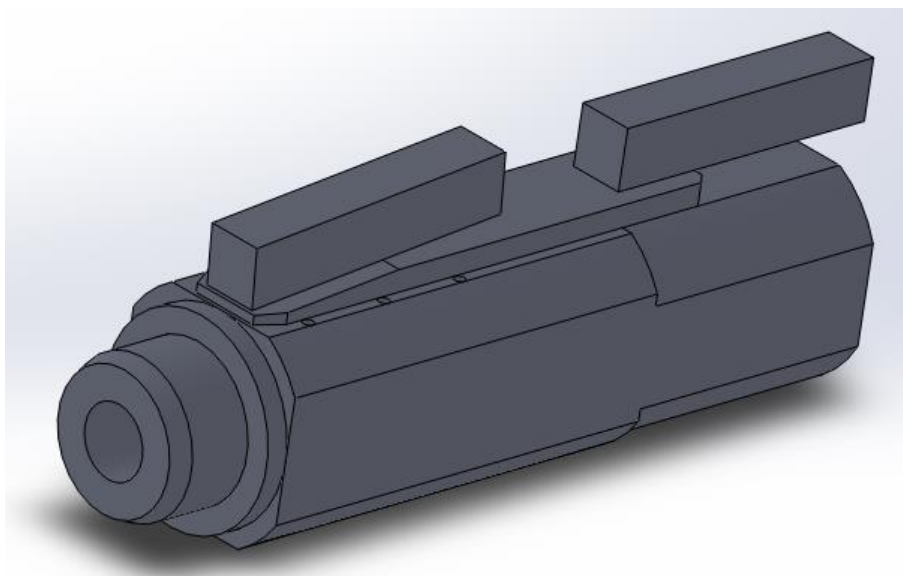


Figura 5.7 - Modelo SolidWorks® do Spindle XLC70.

A partir deste modelo, foi criado um “*assembly*” deste componente com os restantes, que posteriormente foi exportado para 2 formatos:

- Um ficheiro na norma STEP 214 (.step) para poder ser importado no RobotStudio®
- Um ficheiro STL (.stl) para poder ser utilizado no Mastercam®/RobotMaster® como uma ferramenta

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A Figura 5.8 mostra o modelo do conjunto que foi acoplado ao elemento terminal do robô.

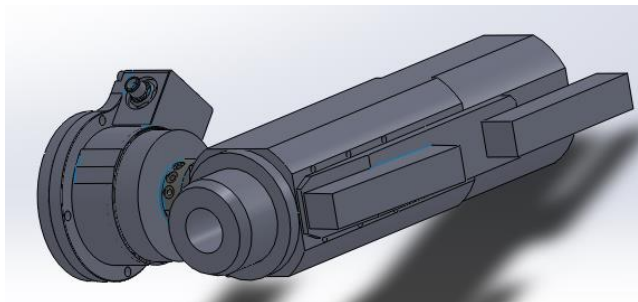


Figura 5.8 - Assembly do conjunto terminal acoplado no robô.

É de notar que estes modelos ainda não incluem qualquer ferramenta, pois ainda não estava definida qual iria ser usada. Sendo estes modelos sujeitos a posteriores alterações.

A inspeção visual da célula real permitiu ver que o conjunto contendo o *spindle*, quando montado no elemento terminal, não se encontrava alinhado nem segundo a horizontal, nem segundo a vertical. A solução passou por medir esse posicionamento, recorrendo a um nível e alterando ao valor da sexta junta do robô. Verificou-se que para um valor de 112° no sentido CCW desta junta, o *spindle* tinha o elemento terminal orientado segundo a vertical, para baixo. Na Figura 5.9, podemos observar o robô na posição “home”², mostrando que o *spindle* não se encontra na horizontal.



Figura 5.9 - Robô na sua posição “home”.

² Posição “home” corresponde a todas as juntas do robô tomarem o valor de 0.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Tendo este valor foi possível definir a orientação do centro de coordenadas do conjunto no SolidWorks®, o que permite uma melhor integração nos restantes *softwares*.

Modelação em Mastercam®/RobotMaster®

A versão do Mastercam® utilizada neste trabalho é a versão X5 Educational. Não sendo a versão mais atual (já estava disponível a versão X6), esta foi escolhida por estar integrada com o *add-on* RobotMaster®.

Este *software* permite a adição de novas ferramentas através de 2 métodos: uma aplicação disponibilizada pelo fabricante do *software*, o *End Effector Tool* e um outro método que consiste em acrescentar os ficheiros de dados das ferramentas. Decidiu-se optar pelo segundo método.

O método consiste em acrescentar dois ficheiros (Figura 5.10) à pasta de ferramentas do RobotMaster®, um ficheiro em formato STL contendo a geometrias da ferramenta e um outro ficheiro XML, com o mesmo nome, apenas mudando a extensão, que contém a posição e orientação do *Tool Center Point* (TCP) da ferramenta.

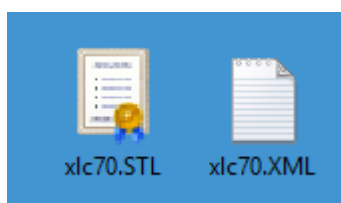


Figura 5.10 - Ficheiros da ferramenta necessários para RobotMaster®.

Abrindo o ficheiro XML, verifica-se que é necessário definir uma posição para o TCP, e definir a matriz de transformação de forma a orientar a ferramenta corretamente. De notar que os eixos de referência da marca ABB não são iguais aos do programa RobotMaster®, pelo que os valores da orientação do TCP não são os mesmos que os definidos na programa SolidWorks®. A Figura 5.11 mostra parte do ficheiro .xml utilizado para criar a ferramenta. A vermelho encontram-se os valores da matriz de transformação e a verde os valores da posição do TCP em relação ao elemento terminal do robô.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

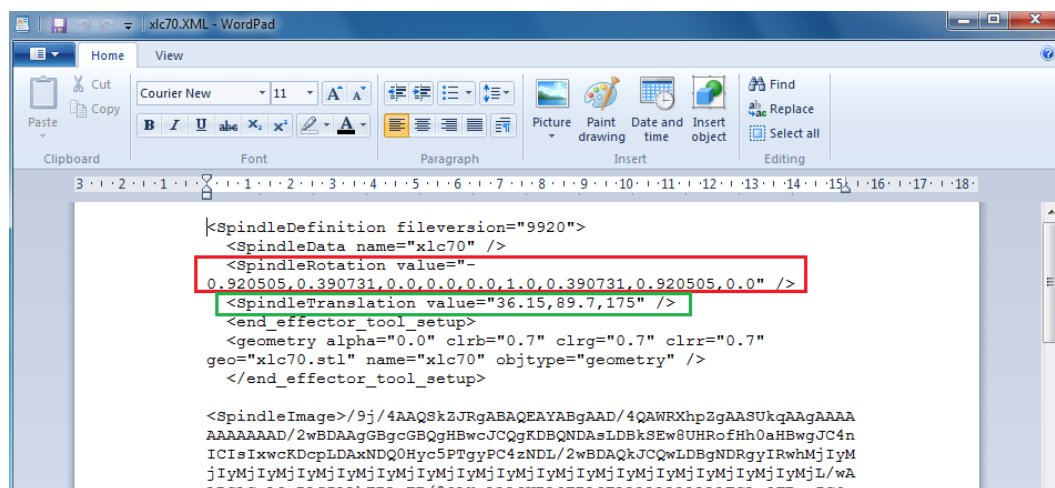


Figura 5.11 - Pormenor do ficheiro .XML utilizado para definir a ferramenta no RobotMaster®.

Para uma melhor compreensão, os valores usados foram os seguintes:



X = -36.15 mm

Y = -89.47 mm

Z = 175 mm

$R_x = 90^\circ$

$R_y = 0^\circ$

$R_z = -23^\circ$

Uma vez que a mesa posicionadora não terá qualquer movimento, não teria interesse recriá-la na célula virtual. No entanto teve-se em atenção a altura do plano da mesa e optou-se por colocar as peças sempre acima desse nível.

Modelação no RobotStudio®

A versão do RobotStudio® utilizada foi a 5.15.00.01, a versão mais atual, enquanto a versão do RobotWare, ou seja, do *software* utilizado pelo controlador, foi a 5.12.

Foi escolhida uma versão mais antiga para o controlador, pois é a existente no controlador real, garantindo assim que o comportamento da célula virtual seria igual ao da real.

A utilização deste programa é importante porque o RobotMaster® não tem em consideração as colisões entre elos do robô, como já foi verificado em trabalhos anteriores, e como garantia de que os traçados que correm neste *software*, correm de igual modo na realidade [21].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Foi criada uma célula robótica virtual (

Figura 5.12), sendo que esta contém o robô, a base onde está apoiado e a mesa posicionadora, bem como o controlador existente, faltando apenas definir a ferramenta e outros dispositivos de segurança, como grades e cortinas de luzes. No entanto, esses sistemas de segurança não são relevantes, visto que o robô não colidirá com eles, e, estando eles visíveis, dificultariam a observação das trajetórias do robô.

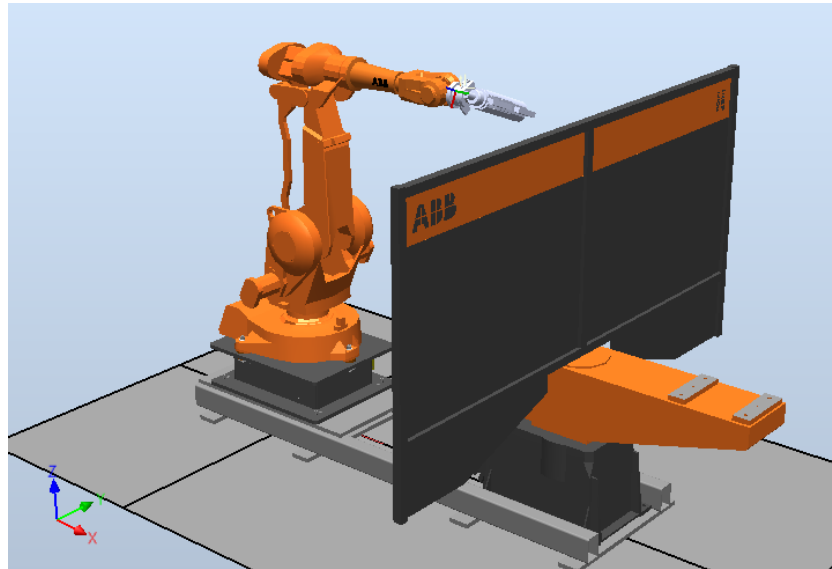


Figura 5.12 - Célula robótica virtual utilizada.

Estando a ferramenta posicionada no local desejado, procedeu-se à determinação do seu peso e respectivo centro de massa. Para isso, e graças à célula de carga e ao controlo de força da ABB, este robô possui uma rotina para determinar tais valores.

Através do *FlexPendant* pode aceder-se ao *RobotWare Machining FC*, e neste, seleccionar a opção *Force Control LoadID* (Figura 5.13), dentro do menu *FC Setup*.

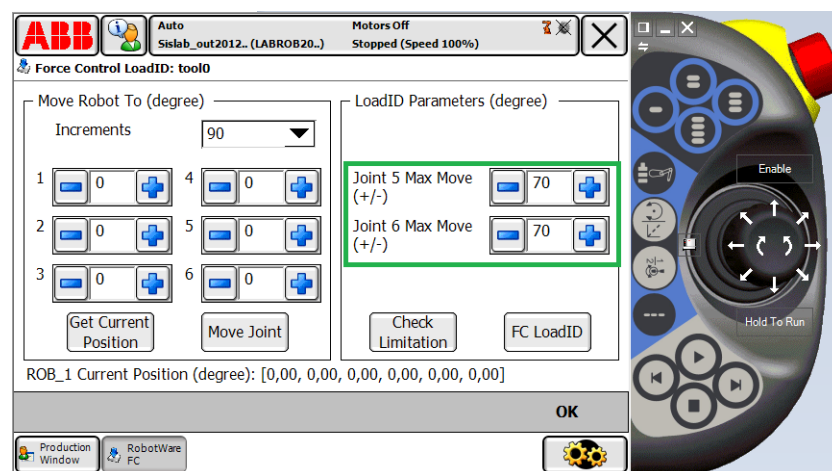


Figura 5.13 - Force Control LoadID.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Esta rotina pergunta ao utilizador quanto quer que as juntas 5 e 6 se movam. Então o robô efetua uma rotação da junta 6 até ao valor pretendido, em ambos os sentidos, neste caso, dos -70° aos 70° , e de seguida procede do mesmo modo para a junta 5. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de massa e centro de massa do *Spindle XLC70*.

Massa	12,2 kg
X	24,2 mm
Y	54,6 mm
Z	126,5 mm

Obviamente, se utilizadas diferentes fresas, estes valores podem mudar, mas considerou-se que essa alteração não seria significativa, devido à pequena massa destas.

Para determinar o *tool center point* recorreu-se ao método dos 4 pontos, com orientação *default*. Este método envolve levar o robô por *jogging* ao mesmo ponto, mas com 4 orientações diferentes. O controlador então aplica um algoritmo que devolve o valor do TCP no *FlexPendant* (Figura 5.14). Adicionalmente, refere o erro máximo, mínimo e médio, que não deve exceder os 2 mm.

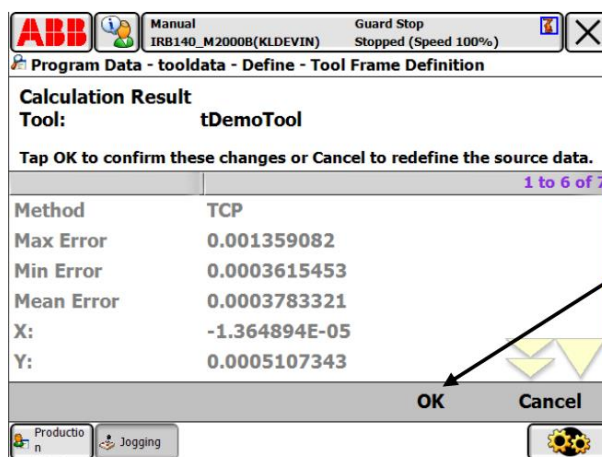


Figura 5.14 - Definição do *tool center point*.

Para definir uma ferramenta, o RobotStudio® tem uma funcionalidade chamada de *Create Tool* (Figura 5.15), em que o utilizador apenas tem de seguir os passos indicados:

- Importar a geometria da ferramenta;
- Definir o peso da ferramenta;
- Indicar as coordenadas do centro de gravidade e momentos de inércia;
- Definir as coordenadas e a orientação o TCP da ferramenta a criar.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Como tal, e tendo todas as informações necessárias, pode preencher-se o formulário da Figura 5.15.

The figure displays two sequential windows from the RobotStudio software used for creating a virtual tool.

Top Window: Create Tool - Tool Information (Step 1 of 2)
This window prompts the user to enter the tool's name and select the associated part. The fields are as follows:

- Tool Name:** MyNewTool
- Select Part:** ☐ Use Existing, ☒ Use Dummy
- Part:** Hemisferio
- Mass (kg):** 1.00
- Center of Gravity (mm):** 0.00 (X), 0.00 (Y), 1.00 (Z)
- Moment of Inertia Ix, Iy, Iz (kgm²):** 0.00 (X), 0.00 (Y), 0.00 (Z)

Bottom Window: Create Tool - TCP Information (Step 2 of 2)
This window prompts the user to name and position the Tool Center Point (TCP). The fields are as follows:

- TCP Name:** MyNewTool
- Values from Target/Frame:** (Dropdown menu)
- Position (mm):** 0.00 (X), 0.00 (Y), 0.00 (Z)
- Orientation (deg):** 0.00 (X), 0.00 (Y), 0.00 (Z)
- TCP(s):** (Empty list box)

Figura 5.15 - Menus para criação de ferramentas no RobotStudio®.

Com este processo, terminou-se a definição da célula robótica virtual, podendo-se proceder aos ensaios de maquinagem.

6. Maquinagem em 3 eixos

Neste capítulo é feita uma exposição da metodologia associada ao processo de maquinagem com Robôs, desde a definição de trajetos de ferramenta, programação *offline*, simulação do processo em ambiente virtual e passagem para o controlador da máquina, bem como a escolha de parâmetros de maquinagem e do material escolhido.

6.1. Material escolhido

O material escolhido para os ensaios foi uma espuma de poliuretano expandido de 55 kg/m³ (Figura 6.1). Escolheu-se este material porque se trata de uma espuma macia, o que não causaria problemas ao robô nem à ferramenta, mas ao mesmo tempo tem uma coesão bastante aceitável, ou seja, não se desfaz quando está a ser maquinada.



Figura 6.1 - Material escolhido para maquinar, espuma de poliuretano expandido de 55kg/m³.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo, da marca ALTIN, e com a referência LH2EMB-060. As suas características apresentam-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Características da ferramenta usada.

Nº de lâminas de corte	2
Diâmetro do veio	6 mm
Comprimento total	100 mm
Profundidade da lâmina	37 mm
Revestimento	Tungsténio

Para melhor visualização das características da ferramenta, segue-se uma imagem desta e do esquema utilizado no Mastercam® (Figura 6.2).

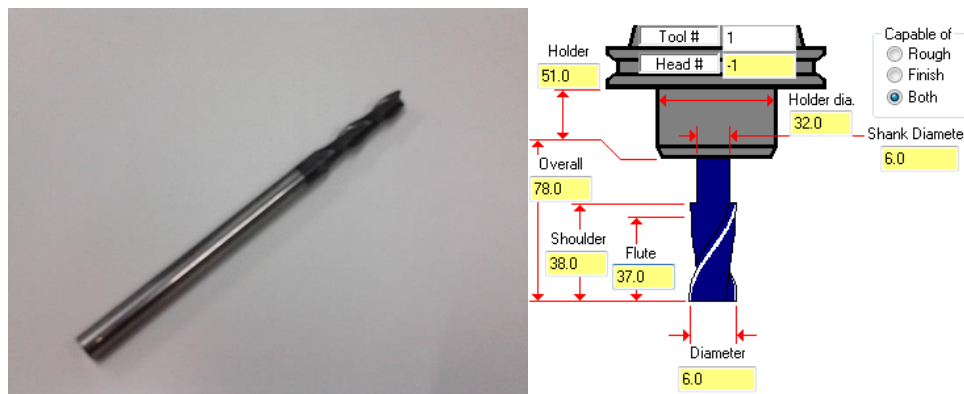


Figura 6.2 - Fresa utilizada (à esquerda) e respetivo esquema no Mastercam® (à direita).

Quanto à pinça que suporta a ferramenta, esta tem a referência 7020.6ER20.060, da marca Horma, sendo a sua norma a DIN 6388b. As especificações encontram-se na Figura 6.3.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

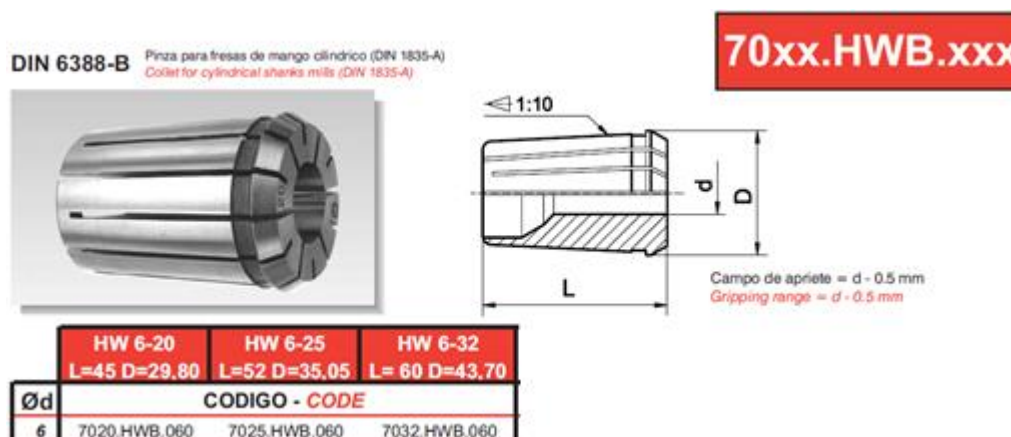


Figura 6.3 - Especificações da pinça utilizada [46].

6.2. Escolha da velocidade de avanço e rotação da ferramenta

De modo a obter um resultado final com maior qualidade, decidiu-se testar diferentes velocidades de avanço e de rotação para o material escolhido.

Como se trata de uma espuma bastante macia, sabe-se que a velocidade de rotação não poderá ser muito alta pois há o risco de esta queimar. No entanto, se este valor for muito baixo, a qualidade superficial pode ser fraca.

Para a velocidade de avanço, sabe-se que quanto mais baixa, melhor será a qualidade da superfície. Porém, uma velocidade de avanço muito pequena fará com que o tempo de maquinagem seja muito longo, o que também não é desejável.

Procedeu-se então à realização de ensaios a diferentes velocidades de avanço e rotação.

O teste consistiu em maquinar um rasgo ao longo da superfície de um bloco do material escolhido.

Foram efetuados, no total, 9 ensaios, para combinações de 5, 25 e 50 mm/s para o avanço e 6000, 12000 e 18000 rpm para a velocidade de rotação do *spindle*.

Os resultados não são numericamente mensuráveis, pois dependeram de uma inspeção visual, pelo que a sua análise é qualitativa. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Tabela 10 – Resultados do ensaio de velocidade de avanço e rotação da ferramenta

Número do Ensaio	Velocidade de avanço [mm/s]	Velocidade de rotação [rpm]	Resultado
1	5	12000	Bom
2	25	12000	Bom
3	50	12000	Bom
4	5	6000	Bom
5	25	6000	Bom
6	50	6000	Bom
7	5	18000	Bom
8	25	18000	Bom
9	50	18000	Bom

Pode ver-se os resultados também na Figura 6.4.

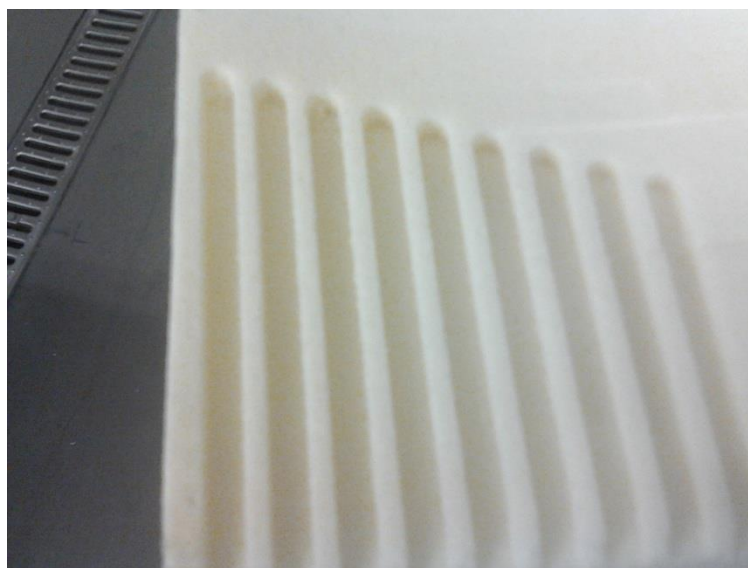


Figura 6.4 - Resultados do teste de velocidade de avanço e rotação.

Para estes parâmetros, o comportamento e qualidade superficial do material não apresenta grandes variações, apresentando uma superfície com uma acabamento que se considera Bom. No entanto, para uma velocidade de avanço de 50 mm/s, durante o ensaio, a rebarba aparentava apresentar um tamanho maior.

Assim, decidiu-se por uma velocidade de avanço de 25 mm/s, visto que esta é uma velocidade já bastante alta, conseguindo assim maquinar em tempos bastante aceitáveis.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Para a velocidade de rotação, optou-se por uma velocidade de rotação de 18000 rpm, pois, teoricamente, é um valor que permite uma melhor qualidade.

6.3. Maquinagem de um paralelepípedo

Nesta secção irá haver uma exposição do processo de maquinagem de uma peça simples, um paralelepípedo.

Modelação de uma peça no programa Mastercam® X5

Em primeiro lugar, foi preciso modelar uma peça para maquinar. Como esta foi a primeira vez que se fez este processo, optou-se por uma geometria simples: um paralelepípedo com as dimensões de 50x50x30mm, modelada no próprio Mastercam®. Para definir esta geometria desenhou-se um quadrado no plano de topo e com um dos vértices na origem do referencial, sendo perguntado de seguida a posição do vértice oposto (Figura 6.5).

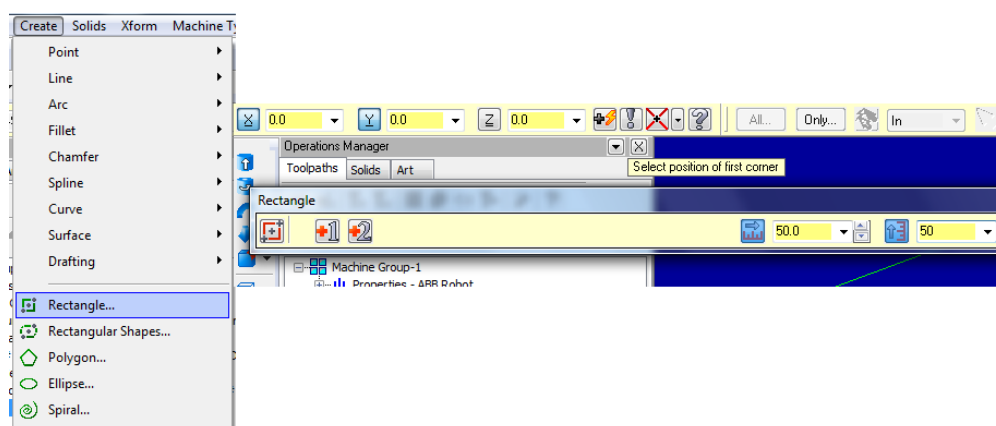


Figura 6.5 - Modelação de um rectângulo em Mastercam® X5.

Seguiu-se um *extrude* de 30mm no sentido positivo do eixo dos Z. Para isto foi preciso seleccionar as linhas a extrudir (*chaining*) e escolher a direcção e distância pretendida (Figura 6.6)

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

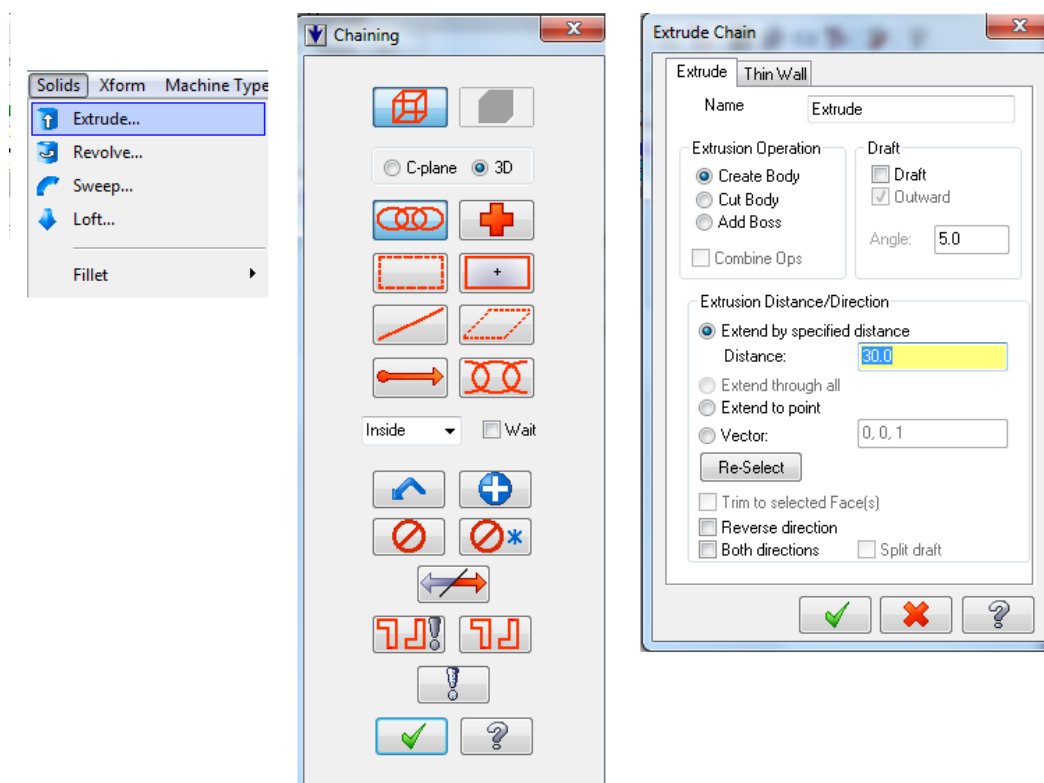


Figura 6.6 - Criação de um *extrude* em Mastercam® X5.

Criação dos percursos de maquinagem

Após obtida a geometria, é exigida a escolha do tipo de máquina que vai ser utilizada. Com o *add-on* RobotMaster®, é permitido escolher o grupo de máquinas que englobam os Robôs ABB (Figura 6.7).

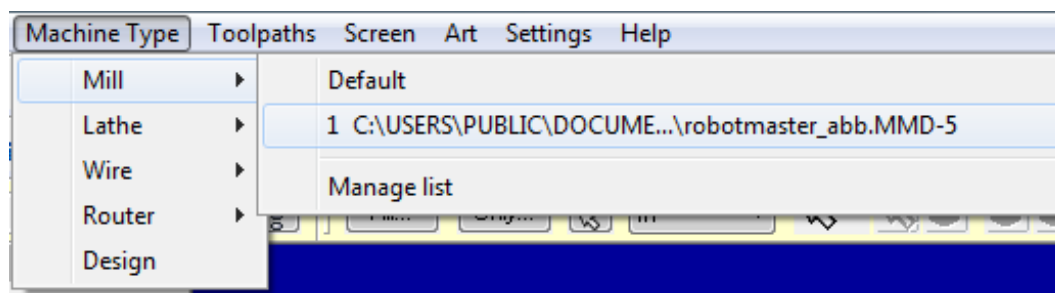


Figura 6.7 - Escolha do tipo de máquina em Mastercam® X5.

O passo seguinte será escolher o tipo de operação pretendida. Neste caso, o objetivo é fazer um desbaste das faces laterais, então escolheu-se um *Rough Contour* (Figura 6.8).

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

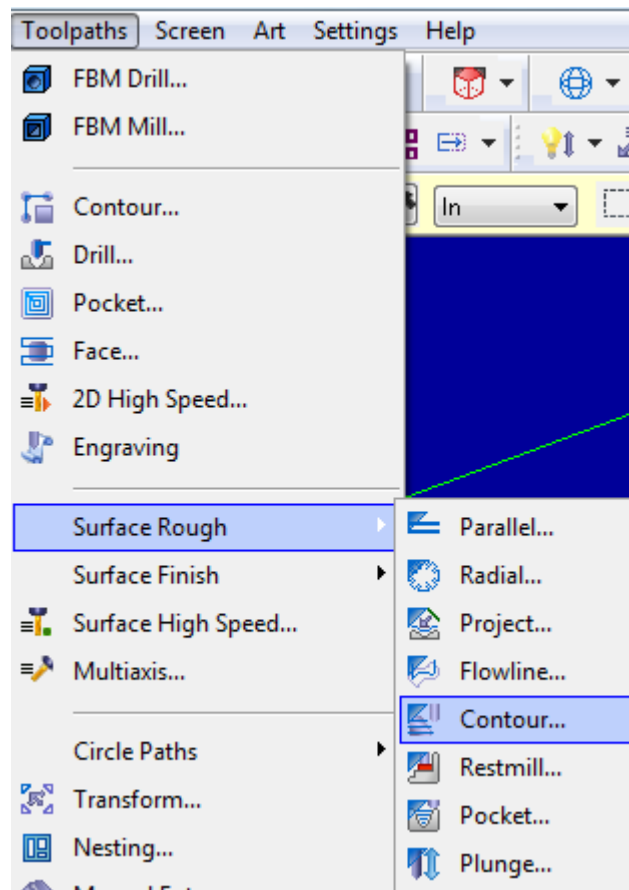


Figura 6.8 - Escolha do tipo de operação em Mastercam® X5.

Neste ponto, é solicitada a escolha das faces a maquinar (Figura 6.9) e os parâmetros a maquinar, nomeadamente a ferramenta e tolerâncias.

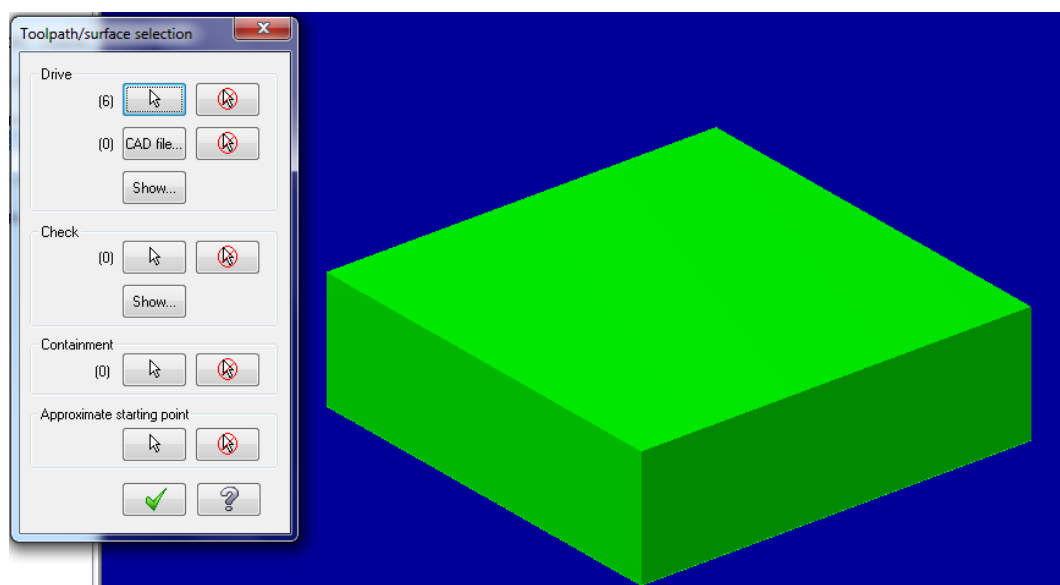


Figura 6.9 - Escolha das faces a maquinar.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Para a ferramenta, os parâmetros utilizados estão na Figura 6.10 e as tolerâncias na Figura 6.11. De notar que é necessário ativar a opção da criação de arcos no plano XY. Caso não seja ativada essa opção, todos os arcos serão aproximados por retas, o que torna o programa mais longo e terá influência na velocidade do robô neste tipo de trajeto, o que não é desejado.

The screenshot shows the 'Surface Rough Contour' dialog box with three tabs: 'Toolpath parameters', 'Surface parameters', and 'Rough contour parameters'. The 'Toolpath parameters' tab is active, displaying a table of tool parameters and various machining settings.

#	Tool Name	Dia.	Cor. rad.	Length
1	20. BU...	6.0	0.0	20.0

Tool name: 20. BULL ENDMILL 4. RAD
Tool #: 1
Len. offset: 177
Head #: -1
Dia. offset: 177
Tool dia: 6.0
Corner radius: 0.0
Coolant...
Spindle direction: CW
Feed rate: 50.0
Spindle speed: 3500
Plunge rate: 25.0
Retract rate: 50.0
☐ Force tool change
☒ Rapid retract
Comment
Select library tool...
Right-click for options
Tool filter
Axis Combo's (Default (1))
Robot Config
To batch
Home pos...
Rotary axis...
Tool display...
Ref point...
Planes...
Canned text...
Buttons: [Green Checkmark] [Red X] [Question Mark]

Figura 6.10 - Definição dos parâmetros de maquinagem.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

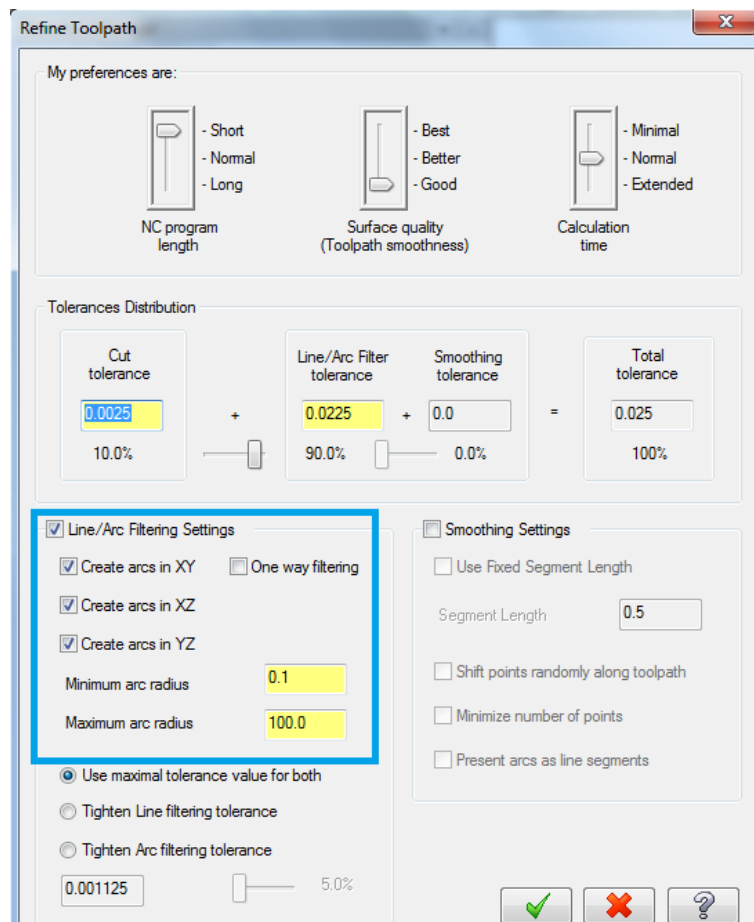


Figura 6.11 - Definição das tolerâncias.

Os trajetos são assim gerados automaticamente e estão visíveis no ambiente virtual (Figura 6.12).

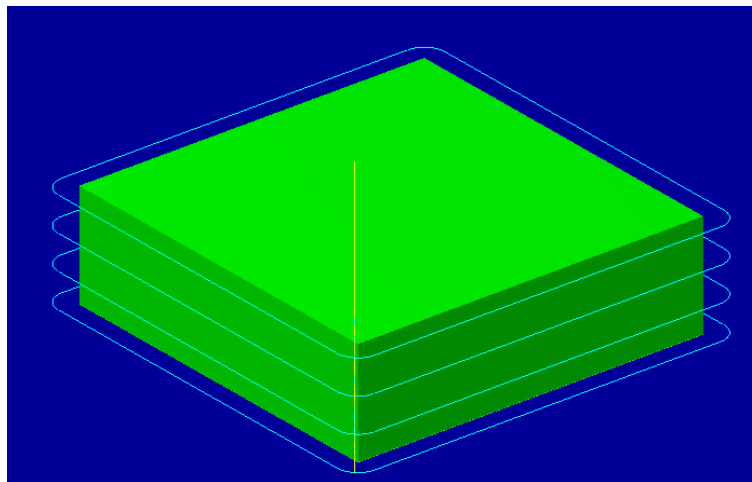


Figura 6.12 - Toolpath criado (linhas azuis) em ambiente virtual.

Utilização do RobotMaster®

Neste momento, podem utilizar-se as potencialidades do RobotMaster®. Este *add-on* é relativamente simples de usar. O primeiro passo é escolher as definições globais. Abre-se então um menu para escolher o robô e a ferramenta, a posição da peça em relação à base do Robô e parâmetros de movimento como velocidade e a zona (Figura 6.13).

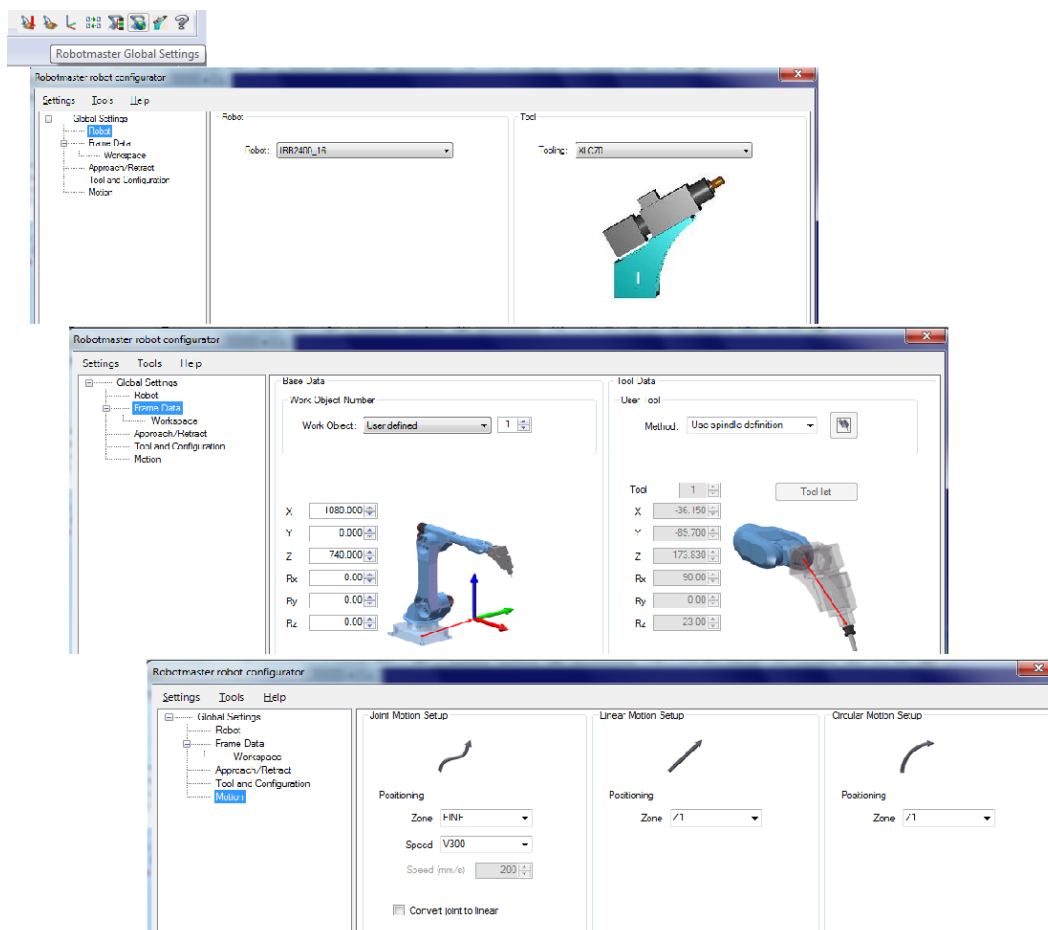


Figura 6.13 - Definição dos parâmetros globais no RobotMaster®.

Nas definições locais, nas opções de *Optimization*, escolhe-se colocar a ferramenta a 45° em relação à peça, pois esta é uma configuração possível para cumprir o requisito de $[-90^\circ; 90^\circ]$ da junta 5. Note-se na Figura 6.14, que a linha agora a verde, tinha de estar fora da zona a amarelo, na qual a peça não se encontra na totalidade dentro do espaço de trabalho, e dentro da zona a vermelho, que significa que a junta 5 está dentro dos limites escolhidos.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

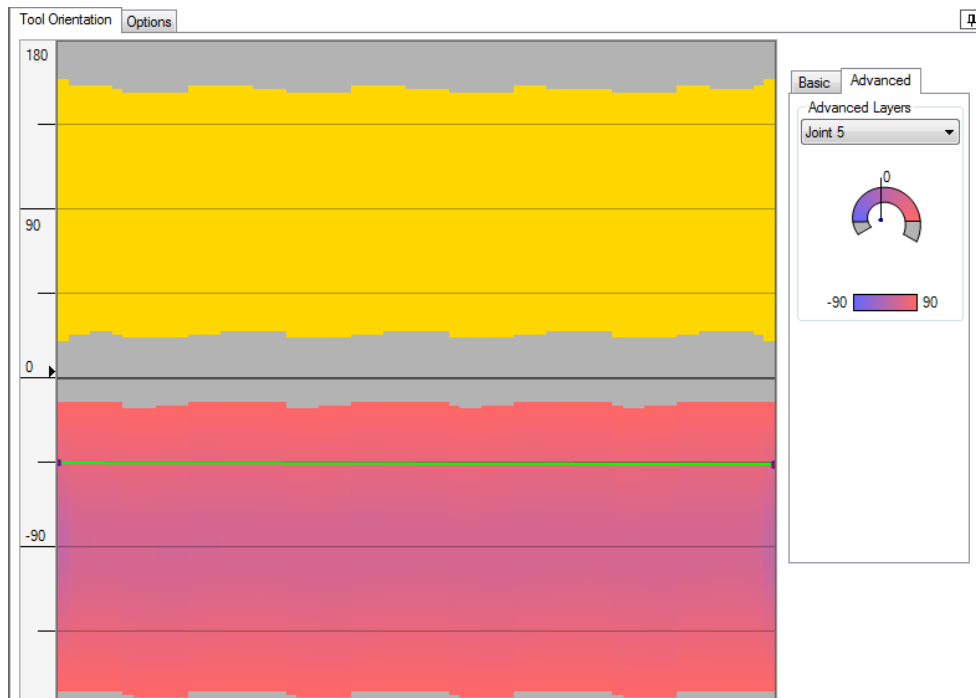


Figura 6.14 - Definições locais no RobotMaster®.

Finalmente, é possível fazer-se uma simulação deste processo para verificar possíveis colisões entre o robô e a peça ou trajetos indesejados que sejam necessários corrigir (Figura 6.15).

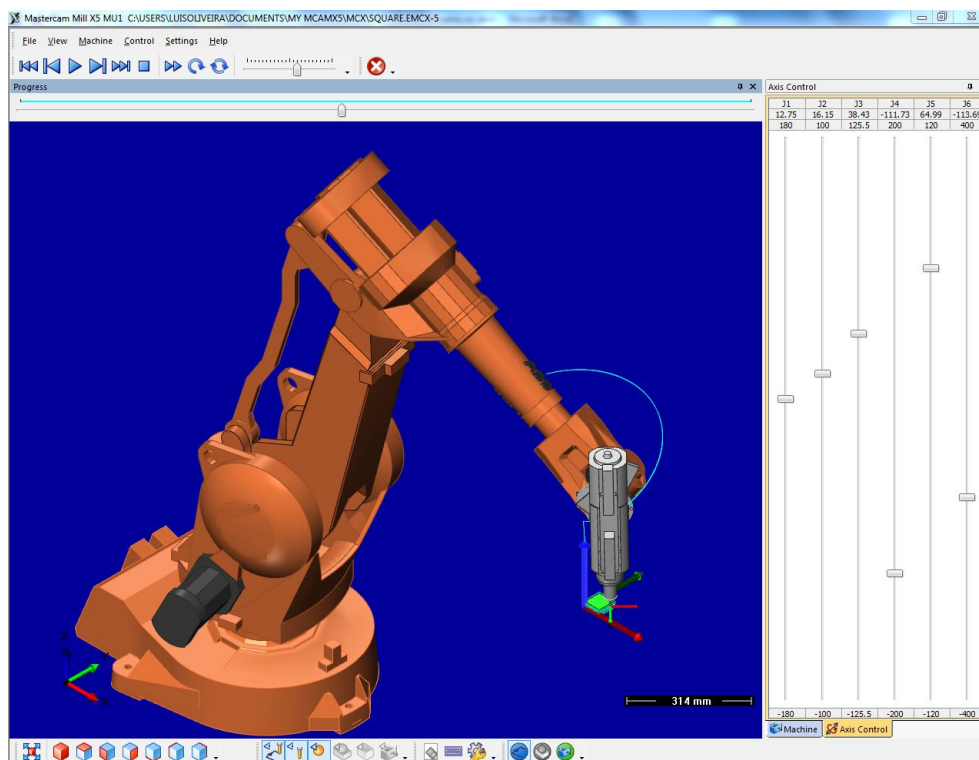
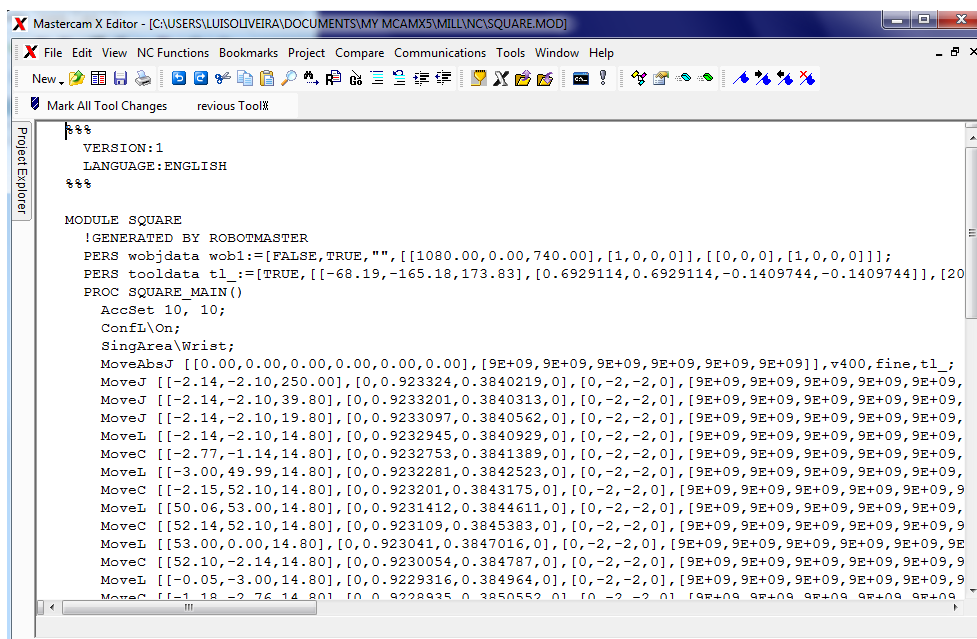


Figura 6.15 - Ambiente de simulação do RobotMaster®.

Geração do código RAPID e simulação em RobotStudio®

É possível agora gerar o código NC, neste caso, o código RAPID. O pós-processador gera um ficheiro .MOD (Figura 6.16), que se abre automaticamente. Aqui há duas opções: copiar o ficheiro para a pasta desejada no RobotStudio®, ou copiar o código e colar no editor de RAPID do mesmo programa. Neste caso, e tendo o código poucas linhas, optou-se pelo segundo método.



```
Mastercam X Editor - [C:\USERS\LUISOLIVEIRA\DOCUMENTS\MY MCAMX5\MILL\NC\SQUARE.MOD]
File Edit View NC Functions Project Compare Communications Tools Window Help
New Open Recent Save Print Setup Tools Help
Mark All Tool Changes previous Tool

Project Explorer
***
VERSION:1
LANGUAGE:ENGLISH
***
MODULE SQUARE
!GENERATED BY ROBOTMASTER
PERS wobjdata wob1:=FALSE,TRUE,"",[[1080.00,0.00,740.00],[1,0,0,0]],[[0,0,0],[1,0,0,0]]];
PERS tooldata tl_:=TRUE,[[[-68.19,-165.18,173.83],[0.6929114,0.6929114,-0.1409744,-0.1409744]],20]
PROC SQUARE_MAIN()
  AccSet 10, 10;
  ConfL\On;
  SingArea\Wrist;
  MoveAbsJ [[0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v400,fine,tl_;
  MoveJ [[-2.14,-2.10,250.00],[0,0.923324,0.3840219,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveJ [[-2.14,-2.10,39.80],[0,0.9233201,0.3840313,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveJ [[-2.14,-2.10,19.80],[0,0.9233097,0.3840562,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveL [[-2.14,-2.10,14.80],[0,0.9232945,0.3840929,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveC [[-2.77,-1.14,14.80],[0,0.9232753,0.3841389,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveL [[-3.00,49.99,14.80],[0,0.9232281,0.3842523,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveC [[-2.15,52.10,14.80],[0,0.923201,0.3843175,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveL [[50.06,53.00,14.80],[0,0.9231412,0.3844611,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveC [[52.14,52.10,14.80],[0,0.923109,0.3845383,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveL [[53.00,0.00,14.80],[0,0.923041,0.3847016,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveC [[52.10,-2.14,14.80],[0,0.9230054,0.384787,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveL [[-0.05,-3.00,14.80],[0,0.9229316,0.384964,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
  MoveC [[-1.18,-2.76,14.80],[0,0.9228935,0.3850552,0],[0,-2,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],
```

Figura 6.16 - Ficheiro com o código RAPID criado.

Este procedimento não é suficiente para ter os trajetos no ambiente virtual do RobotStudio®. É preciso uma sincronização do código do controlador para a estação virtual. Isto permite verificar os percursos e escolher as configurações da melhor maneira para realizar a simulação.

Neste ponto, verifica-se que o *workobject* não está na melhor localização, pois encontra-se na base do paralelepípedo. Ora, como o material a maquinar tem mais de 30mm de altura, não é possível deslocar o *workobject* para a base da geometria. Portanto, o ideal seria ter um *workobject* no topo do paralelepípedo. Deslocou-se então o *workobject* para esse ponto.

Estando tudo configurado da melhor forma, procedeu-se a uma simulação, com recurso a um *colision set*, ou seja, uma verificação de colisões. Esta funcionalidade é bastante simples de utilizar, basta deslocar os objetos em dois grupos. O *software* encarrega-se de verificar se algum elemento de um grupo colide com algum elemento do outro.

Para o grupo A, escolheu-se todos os elos do robô à exceção da junta 6, pois a ferramenta está acoplada neste. Para o grupo B, escolheu-se a ferramenta XLC70 (Figura 6.17).

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

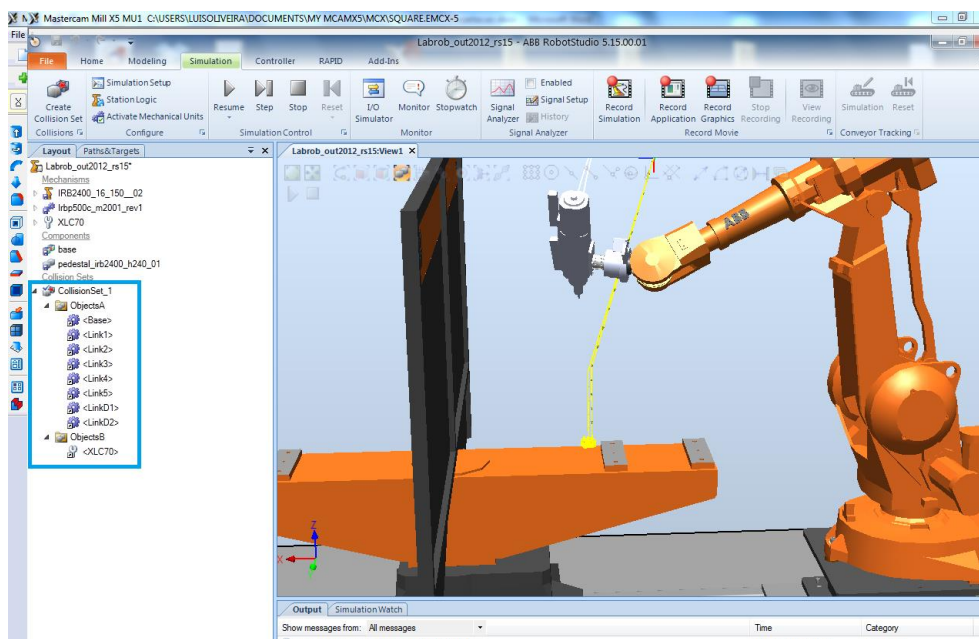


Figura 6.17 - Simulação do processo em RobotStudio® (a azul o *collision set* escolhido).

Após simulação, verificou-se que não existiam colisões, sendo então seguro passar o programa para o controlador.

A ligação ao controlador pode ser feita de duas formas: ligando o computador ao controlador e pedindo um *Write Access Request*, passando o controlador a estar disponível no computador. Ou passando o programa para o computador que está ligado ao controlador.

Quando o programa está no controlador do robô, estão reunidas as condições para o correr no Robô IRB2400.

Tendo os valores relativos à ferramenta definidos, chegou a altura de deslocar o *workobject* para o local desejado. Escolheu-se um ponto no topo do material e usou-se o método dos 3 pontos para definir o *workobject*.

Finalmente, correu-se o programa no robô a uma velocidade de 25 mm/s.

No fim do ensaio, verificou-se uma qualidade superficial bastante aceitável, podendo-se dizer que os resultados foram bastantes satisfatórios.

7. Maquinagem em 5 eixos

Tendo já demonstrado o método para maquinagem de uma peça simples, em 3 eixos, o passo seguinte foi passar para geometrias de complexidade superior. Este capítulo serve para demonstrar as potencialidades que os robôs têm em maquinar peças de geometrias mais complexas, nomeadamente, maquinar em 5 eixos.

7.1. Maquinagem de um molde de um rato

A primeira peça escolhida foi um molde de uma peça de um rato de computador. Optou-se por esta peça, porque a maquinagem de moldes com robôs tem um crescente interesse (ver secção 4.3-

Tromes Design) e a exigência em termos de movimentos não é muito grande para este modelo em particular.

Criação do programa

Em primeiro lugar, importou-se a peça para o espaço de trabalho virtual do Mastercam® (Figura 7.1) e escolheu-se o tipo de máquina, os robôs da marca ABB. Neste caso optou-se por fazer o “macho”, já que a “fêmea” constitui uma cavidade, o que não é favorável a uma fresa plana como a utilizada (ver secções 6.1 e 2.2.).

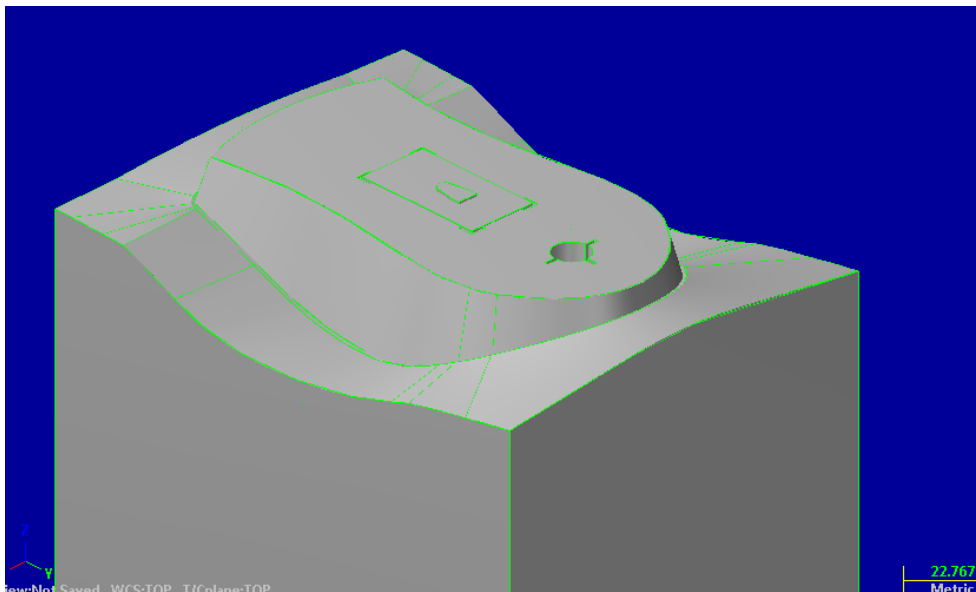


Figura 7.1 - Ficheiro do molde do rato importado.

De seguida, criou-se um contorno da peça, da mesma forma que na secção 6.3 - Criação dos percursos de maquinagem.

A operação seguinte consistiu na maquinagem das superfícies assinaladas a amarelo na Figura 7.2.. Para isso, utilizou-se uma operação *Multiaxis*, a maquinagem paralela a superfícies.

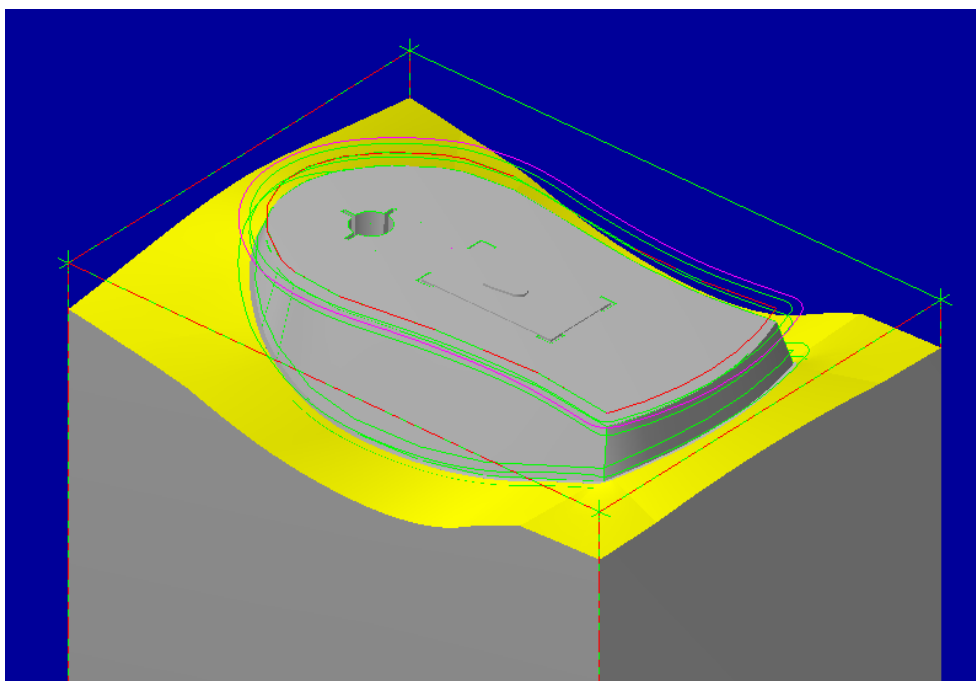


Figura 7.2 - Superfície escolhida para a primeira operação de maquinagem do molde do rato.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Esta operação consiste essencialmente na escolha de duas superfícies:

- *Single edge surface*, a superfície a que o *toolpath* é paralelo,
- *Drive surfaces*, a superfície a maquinar.

Além disso, devem ser definidos outros parâmetros como *stepover*, que foi definido como 5 mm. O resultado obtido pode ser visto na Figura 7.3.

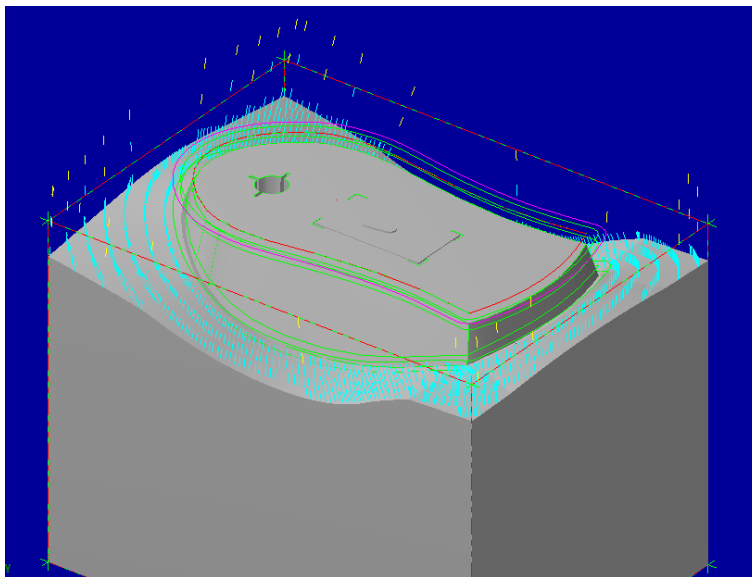


Figura 7.3 - Toolpath da primeira operação de maquinagem do molde do rato.

A operação seguinte consistiu na maquinagem das faces laterais do rato (a amarelo na Figura 7.4). Para isso, fez-se um *offset* das arestas da face superior e efetuou-se uma operação *Multiaxis*, maquinagem sobre essa linha, com várias passagens. O resultado também está ilustrado pelas linhas azuis na Figura 7.4.

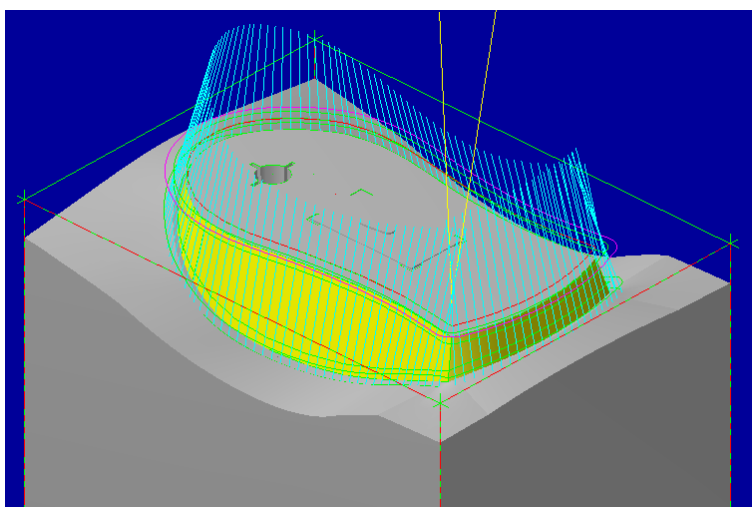


Figura 7.4 - Toolpath criado para maquinagem das faces laterais do rato.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Estas duas operações são suficientes para maquinar esta peça. Em termos de configurações do robô, verificou-se que esta peça podia ser maquinada em vários locais do espaço de trabalho. O menu *Optimization* para as duas operações apresenta-se na Figura 7.5.

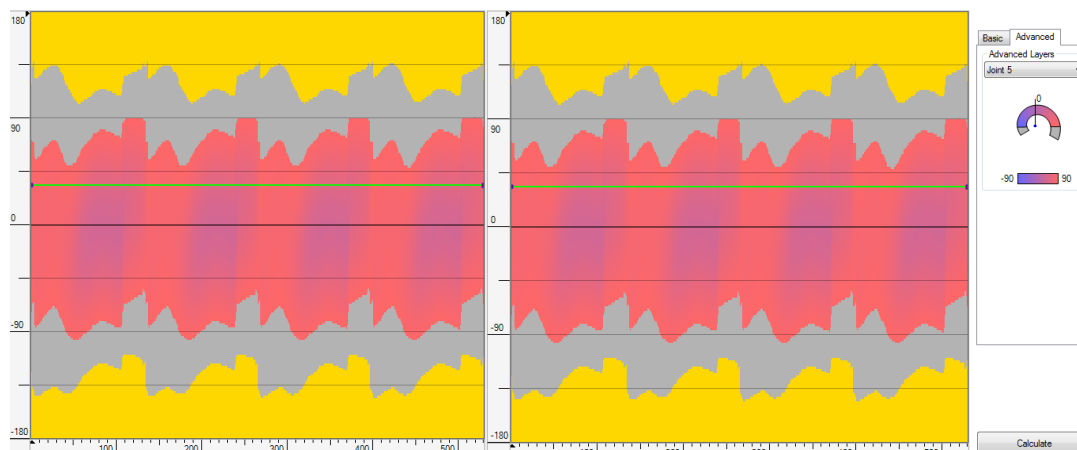


Figura 7.5 - Menu *Optimization* para as duas operações do molde do rato.

A solução mais óbvia aparenta ser colocar a linha nos 0°, visto essa ser uma posição mais “neutra”, no entanto, optou-se por colocá-la em volta dos 30°, devido à junta 4. Nesta orientação, a referida junta movimenta-se ao longo do percurso, afastada de zonas de singularidade, como pode ser visto na Figura 7.6, onde a zona verde corresponde a uma rotação dessa junta próxima do seu máximo.

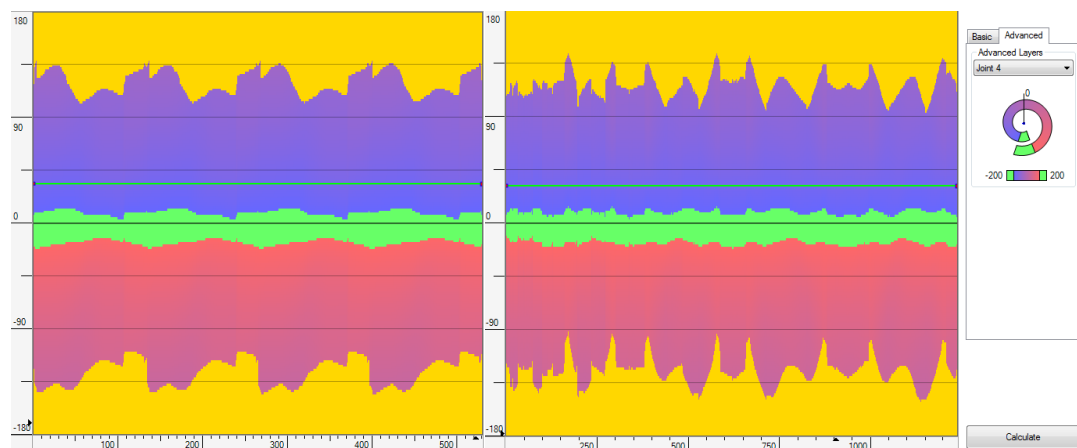


Figura 7.6 - Menu *Optimization* para a junta 4 nas operações do molde do rato.

A simulação em ambiente virtual não apresentou problemas, portanto o programa foi pós-processado com os parâmetros adicionais visíveis na Tabela 11.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Tabela 11 - Opções adicionais da trajetória do molde do rato.

Feedrate	25 mm/s
Spindle rotation	18000 rpm
Robot	IRB 2400_16
Workobject ³	X = 1080 mm
	Y = 0 mm
	Z = 520 mm
	Rx = 0°
	Ry = 0°
	Rz = 90°
Zone	Z1

No RobotStudio®, também não surgiram colisões nem movimentos indesejados, os *paths* criados podem ser visualizados na Figura 7.7.

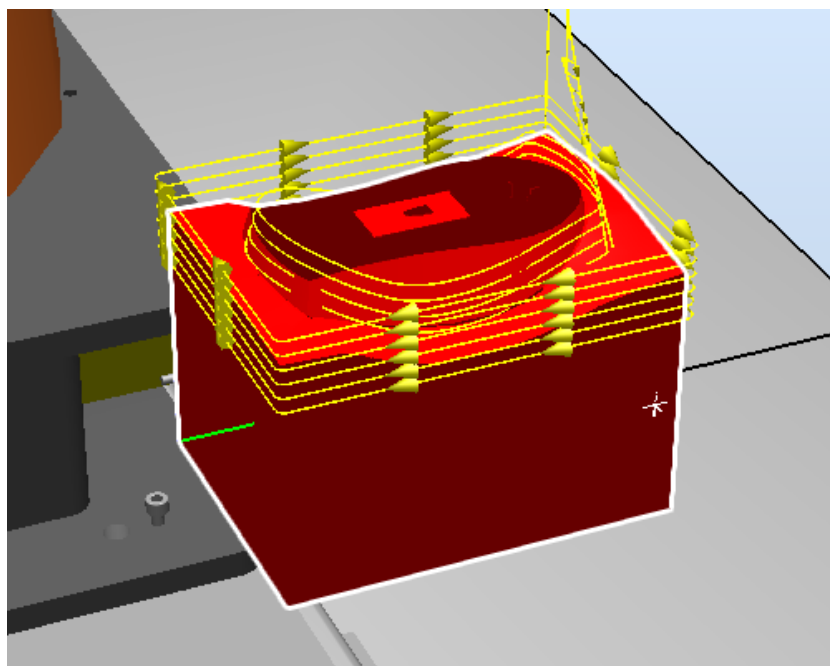


Figura 7.7 - *Paths* gerados para a maquinagem do molde do rato.

³ Os valores definidos para o workobject são relativos ao referencial base do robô

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Primeiro ensaio

O programa foi executado num bloco do material escolhido (Secção 6.1) e a uma velocidade de avanço de 25 mm/s a 18000 rpm como previsto na secção 6.2. O bloco mencionado pode ser visualizado na Figura 7.8. O *workobject* foi deslocado para o ponto assinalado pelas setas na imagem.



Figura 7.8 - Bloco utilizado para maquinar o molde do rato.

Resultados

O primeiro e único ensaio revelou uma superfície bastante macia, mais que foi prevista pelo Mastercam®. Isto deve-se ao facto de a fresa deslocar-se sempre perpendicular ou paralela às superfícies durante todo o percurso de maquinagem. Pode-se observar os resultados na Figura 7.9.



Figura 7.9 - Resultados da maquinagem do molde do rato.

O resultado foi satisfatório, pelo que optou-se por não realizar mais nenhum ensaio.

7.2. Maquinagem de um rotor

Para um segundo ensaio, foi escolhido um rotor (Figura 7.10) utilizado, por exemplo em turbinas. Escolheu-se essa peça devido à sua elevada complexidade mas também por ter uma larga aplicação no âmbito da Engenharia Mecânica. O desafio na maquinagem deste tipo de geometrias reside na escolha das configurações do robô e não tanto na definição dos percursos de maquinagem.



Figura 7.10 - Exemplo de um rotor(à esquerda) e de uma das suas aplicações, um turbocompressor (à direita).

Criação do programa

O primeiro passo para a criação dos percursos de maquinagem é a importação do modelo do rotor (Figura 7.11) e escolha do tipo de máquina, mais uma vez os robôs da marca ABB.

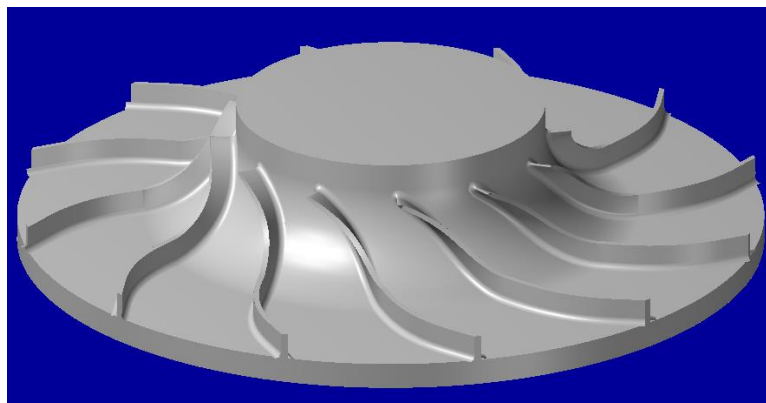


Figura 7.11 - Modelo do rotor importado.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Seguidamente utilizou-se a opção *Impeller Floor Surface Without Tilted Curve*, presente na opção *Multiaxis* dos *toolpath* (Figura 7.12). Esta opção serve para maquinar o “chão” do rotor, ou seja, não maquinando as pás da turbina, mas deixando material para estas serem posteriormente acabadas.

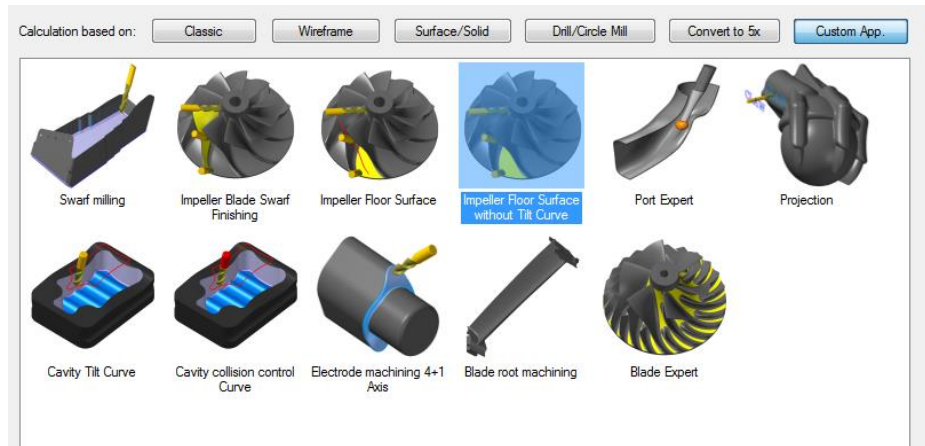


Figura 7.12 - Opção escolhida para maquinar o "chão" do rotor.

Esta opção permite ao utilizador, de forma bastante intuitiva, escolher os parâmetros adequados para que o programa gere as trajetórias para um rotor deste tipo. Basta para isso seleccionar três aspetos importantes (Figura 7.13).

1. Escolha das superfícies de controlo (a vermelho);
2. Seleção do método de corte (a azul);
3. Definição de parâmetros importantes (a verde).

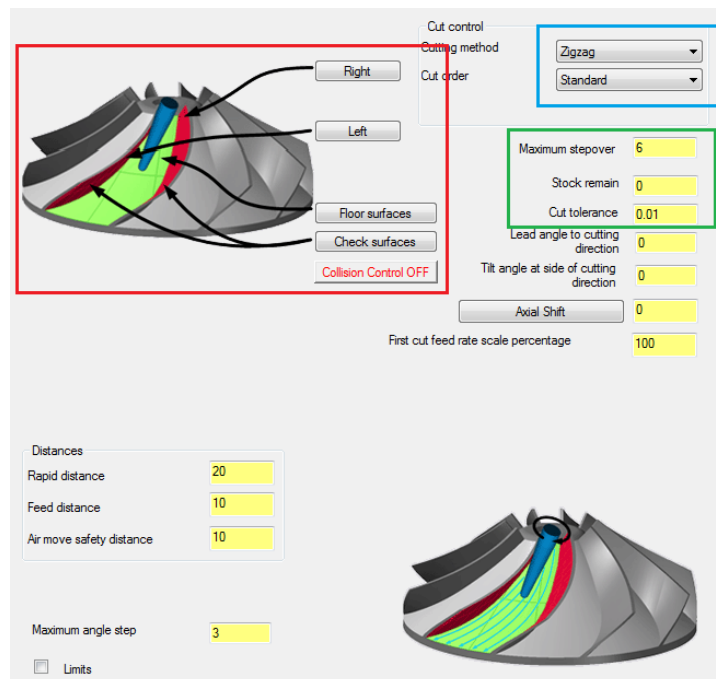


Figura 7.13 - Menu de escolha dos parâmetros para a operação *Impeller Floor Surface Without Tilted Curve*.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A Figura 7.14 ilustra as escolhas para as superfícies de controlo (direita, esquerda e “chão”)

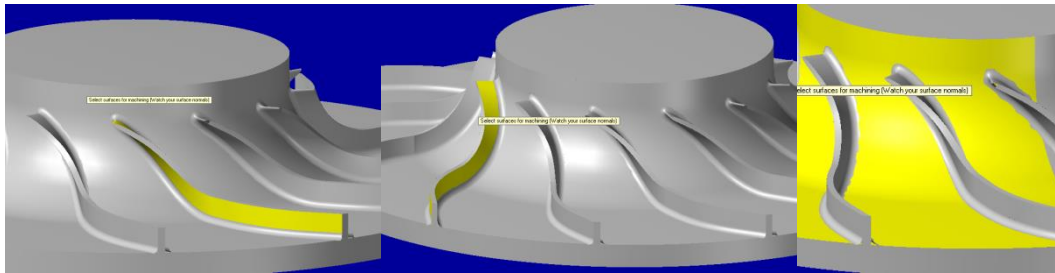


Figura 7.14 - Superfícies escolhidas para controlo.

O resultado obtido foi o da Figura 7.15.

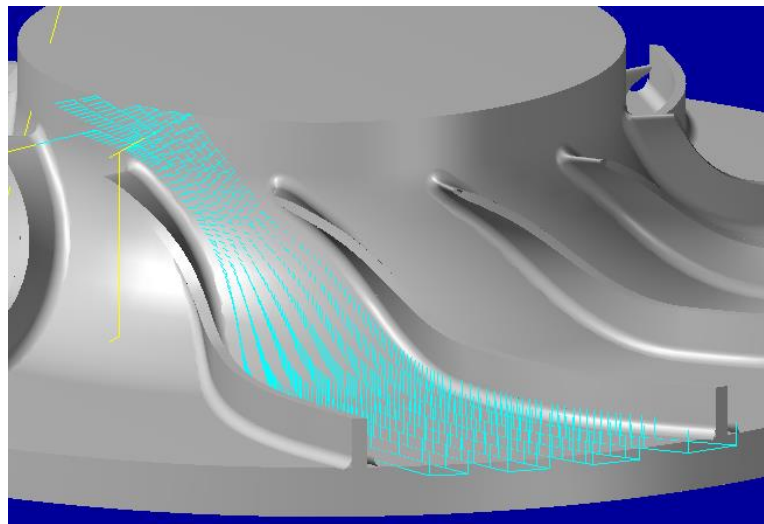


Figura 7.15 - Trajeto obtido.

No menu *Optimization* (ver secção 4.2 –Mastercam®/RobotMaster®), decidiu-se por orientar a ferramenta 180° em relação à peça, portanto a linha ficaria no topo do menu, correspondente a esses mesmos 180° (Figura 7.16). Esta configuração pressupõe uma rotação da peça de -90° em torno do eixo dos X, visto que verificou-se que seria a posição mais favorável.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

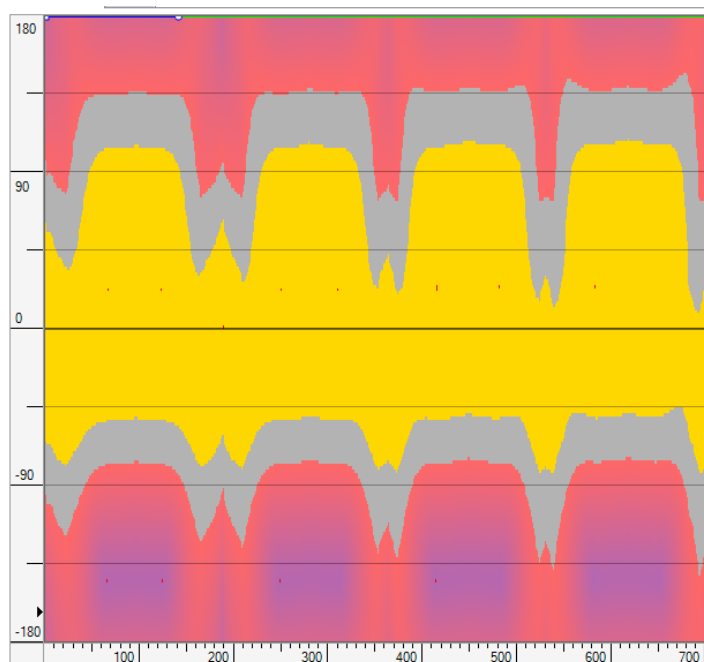


Figura 7.16 - Menu *Optimization* para a operação de maquinagem do rotor.

Após verificação através do simulador virtual, pôde-se pós-processar o trajeto com as definições adicionais presentes na Tabela 3.

Tabela 12 - Opções adicionais da trajetória do rotor.

Feedrate	25 mm/s
Spindle rotation	18000 rpm
Robot	IRB 2400_16
Workobject	X = 1080 mm
	Y = 0 mm
	Z = 470 mm
	Rx = -90°
	Ry = 0°
	Rz = 0°
Margins	3 mm
Zone	Z1

No RobotStudio® também se verificou, através de simulação que o programa não apresenta riscos para o robô. Pode ver-se um aspeto dessa simulação na Figura 7.17.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

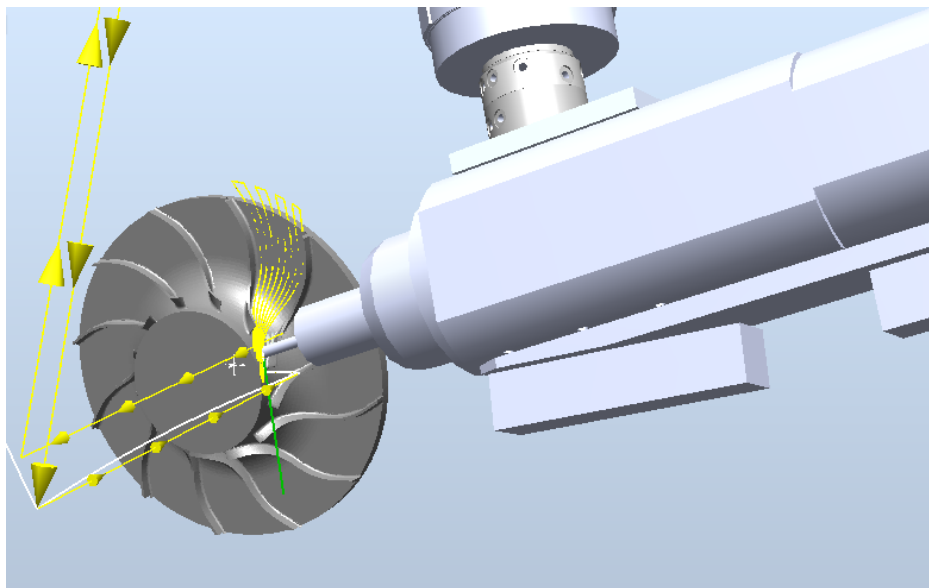


Figura 7.17 - Simulação do processo de maquinagem do rotor.

É importante referir que o objeto-peça (*workobject*) foi deslocado para o centro da face superior, uma vez que seria útil se se desejasse rodar a peça para maquinar as outras pás do rotor.

Por razões de segurança, criou-se ainda uma rotina para desbastar um pouco o material a maquinar, para que a ferramenta não corresse o risco de colidir com a peça.

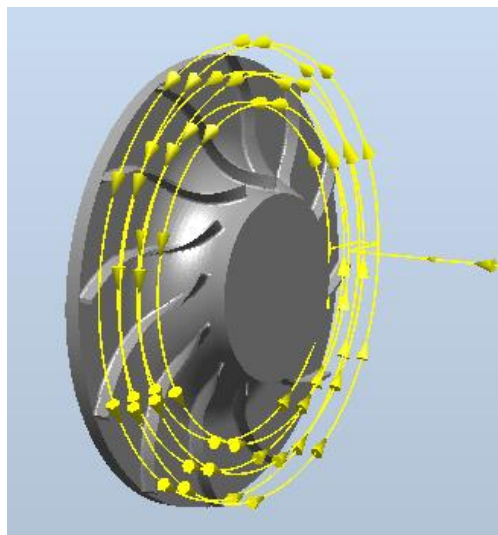


Figura 7.18 - Rotina de desbaste para a maquinagem do rotor.

Primeiro ensaio

O programa foi executado num bloco do material escolhido, espuma de poliuretano expandido de 55 kg/m^3 (Secção 6.1) com a forma apresentada na Figura 7.19. A circunferência representada tem um diâmetro da 185 mm, idêntico ao diâmetro do rotor.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A velocidade de avanço fixou-se nos 25 mm/s e a de rotação da ferramenta nas 18000 rpm, como previsto pelos testes realizados (Secção 6.2).



Figura 7.19 - Bloco de material a partir do qual se maquinou o rotor.

Num primeiro ensaio, optou-se então por maquinar apenas uma face para analisar os resultados iniciais, seguindo-se a maquinagem do resto da peça.

Resultados

Após o primeiro ensaio, verificou-se uma superfície com uma qualidade muito apreciável, visto que a ferramenta, que é plana, se desloca quase na totalidade do percurso, perpendicular à superfície. Pode-se observar o resultado na Figura 7.20.



Figura 7.20 - Resultado do primeiro ensaio da maquinagem do rotor.

Sendo o resultado do primeiro ensaio satisfatório, procedeu-se à maquinagem das restantes superfícies da peça.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Segundo ensaio

Para uma segunda experiência, resolveu-se maquinar 3 faces do rotor para serem possíveis criar pelo menos duas pás. Para isso, modificou-se a posição da peça no espaço de trabalho, como pode ser visto na Figura 7.21.

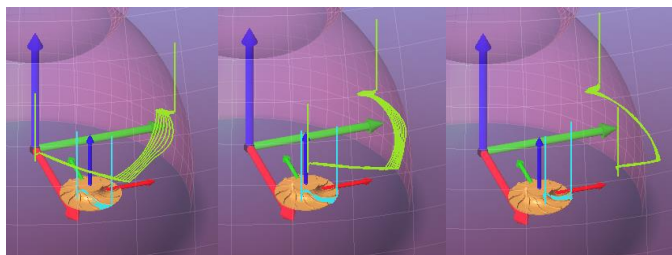


Figura 7.21 - Menu *Workspace* para as três operações do segundo ensaio de maquinagem do rotor.

Assim, o *workobject* passou a ter os seguintes valores:

X= 1000 mm

Y= -150 mm

Z= 526,5 mm

Rx = 0°

Ry = 0°

Rz = 90°

Para realizar este ensaio, utilizou-se o mesmo bloco do ensaio anterior e as mesmas velocidades de avanço e de rotação.

Resultados

O segundo ensaio revelou três superfícies das faces com qualidade idêntica às do primeiro ensaio, como seria de esperar. No entanto, as pás do rotor apresentam uma espessura maior na sua parte inferior do que na superior. Apresentam-se os resultados na Figura 7.22.



Figura 7.22 - Resultados do segundo ensaio de maquinagem do rotor.

7.3. Maquinagem de um puzzle de geometria complexa

Para o terceiro ensaio, decidiu-se maquinar um puzzle de geometria complexa. Trata-se de um cubo que é dividido em duas partes exatamente iguais, mas cada uma delas apresenta uma geometria bastante complexa (Figura 7.23). Esta peça apresenta uma dificuldade elevada na elaboração dos caminhos de maquinagem, sendo relativamente simples de definir as configurações para o robô.

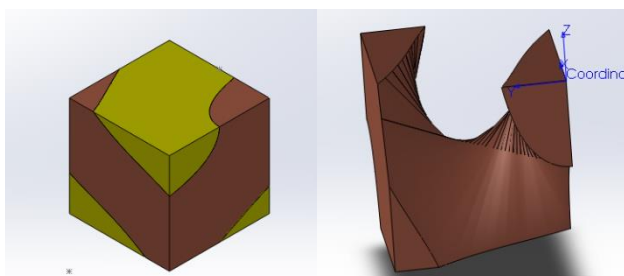


Figura 7.23 - Cubo a maquinar, puzzle completo à esquerda, uma das partes à direita.

Criação do programa

Numa primeira etapa foi preciso criar uma geometria de um cubo, para isso recorreu-se às capacidades de CAD do Mastercam®, e usando a seguinte metodologia:

1. Criação de um quadrado (Create→Rectangle);
2. *Extrude* do quadrado (Solids→Extrude).

De seguida criou-se o *toolpath* de *Rough Countour*, com um *stepdown* de 12,4 mm. O resultado pode-se ver na Figura 7.24.

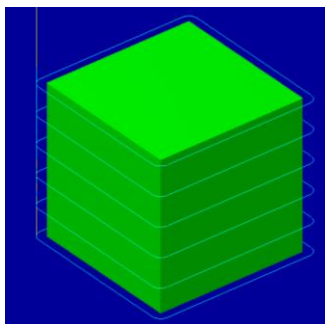


Figura 7.24 - Toolpath do contorno do cubo inicial.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

De seguida, procedeu-se ao desbaste da zona interior do material, para isso importou-se o modelo da peça a maquinar e escolheu-se a operação *Surface Rough Pocket* com um *stepdown* máximo de 10 mm e um *stepover* de 5 mm. Pode-se observar o resultado na Figura 7.25.

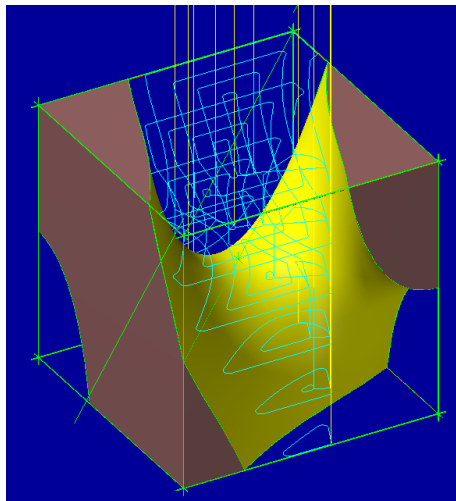


Figura 7.25 - Toolpath de desbaste do cubo inicial.

Para estas duas primeiras operações iniciais, visto se tratarem de operações de 3 eixos, as orientações da ferramenta em relação à peça não apresentam grande obstáculo. O menu *Optimization* para estas operações apresenta-se na Figura 7.26.

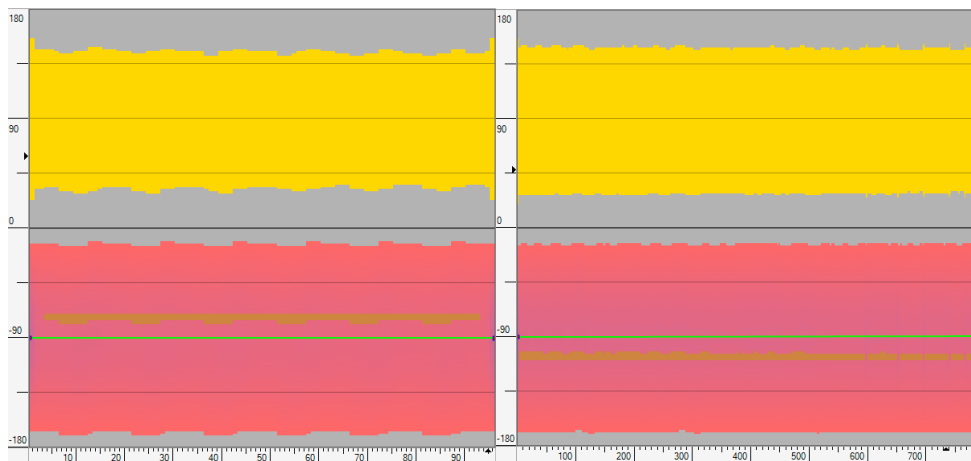


Figura 7.26 - Menu *Optimization* para as 2 operações iniciais do puzzle.

Visto tratar-se de uma peça perfeitamente simétrica em relação às diagonais das faces que se encontram no plano XY, decidiu-se por criar os *toolpaths* para apenas metade do sólido, e seguidamente, fazer um *mirror* quer dos *features* que dos percursos criados.

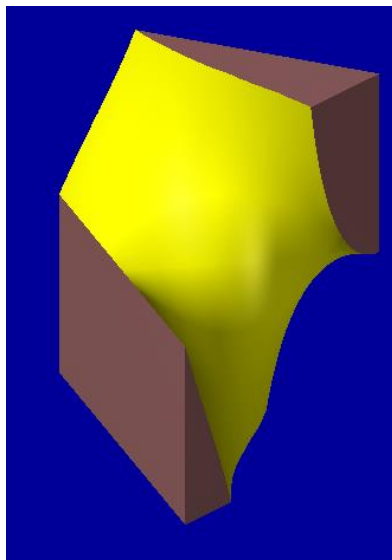


Figura 7.27 - Modelo de metade do cubo importado, a amarelo a face a maquinar.

Após importação do modelo de metade da peça, o passo seguinte foi criar um percurso do tipo *Flow*, presente na opção *Multiaxis*. A face escolhida a maquinar pode ser vista na Figura 7.27.

Para o controlo do eixo da ferramenta, decidiu-se que este devia mover-se segundo uma linha. Para a criação dessa linha, teve-se de proceder a 3 operações:

1. Criação de uma *bounding box* (create → Bounding Box);
2. Criação de uma diagonal na face de cima da *bounding box* (Create→Line→Endpoint);
3. Fazer uma *Translate* da diagonal criada. (XForm→Translate).

A linha criada encontra-se na Figura 7.28.

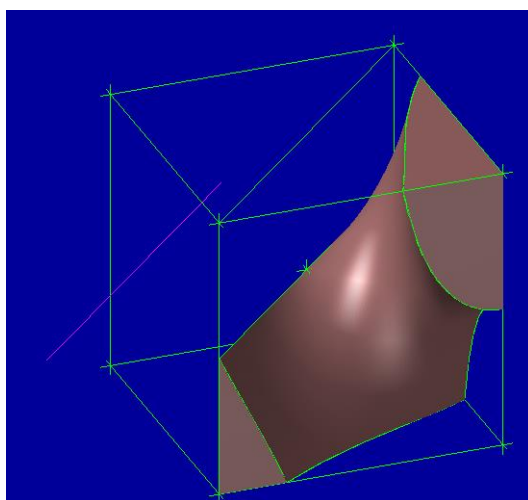


Figura 7.28 - Linha de controlo do eixo da ferramenta (a roxo).

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

O percurso foi criado para um *step across* de 5mm. Após criação deste primeiro percurso foi efetuado o *mirror* de todos os *features* e do *toolpath* criado. O resultado encontra-se na Figura 7.29.

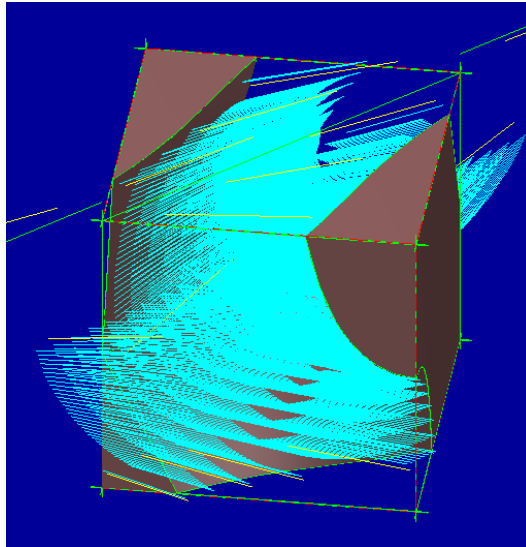


Figura 7.29 - Toolpath criado para a peça do cubo (linhas a azul).

Aplicou-se ainda um acabamento a parte da superfície através de um *Rough Countour*, como se vê na Figura 7.30.

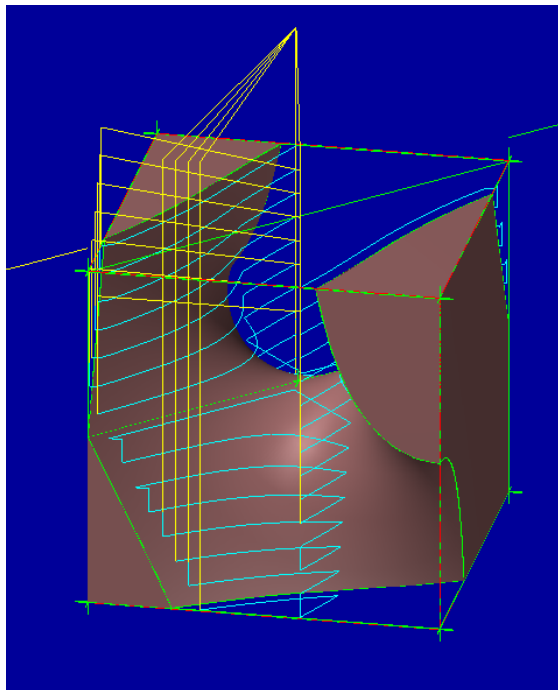


Figura 7.30 - Acabamento da superfície.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

A nível das configurações do robô, o menu *Optimization* para as três operações ficou com o aspeto da Figura 7.31.

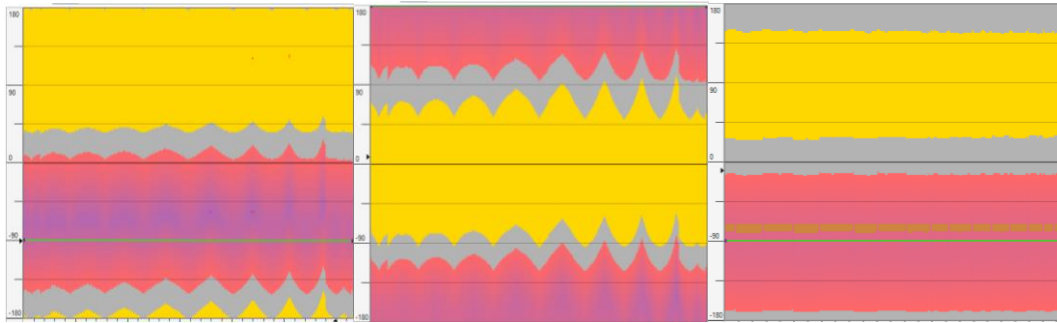


Figura 7.31 - Menu *Optimization* para as 3 operações finais do puzzle.

No RobotStudio®, verificou-se que não haveria colisões depois de escolhidas as configurações, pelo que se poderia proceder à maquinagem da peça. O trajeto da primeira operação neste programa apresenta-se na Figura 7.32.

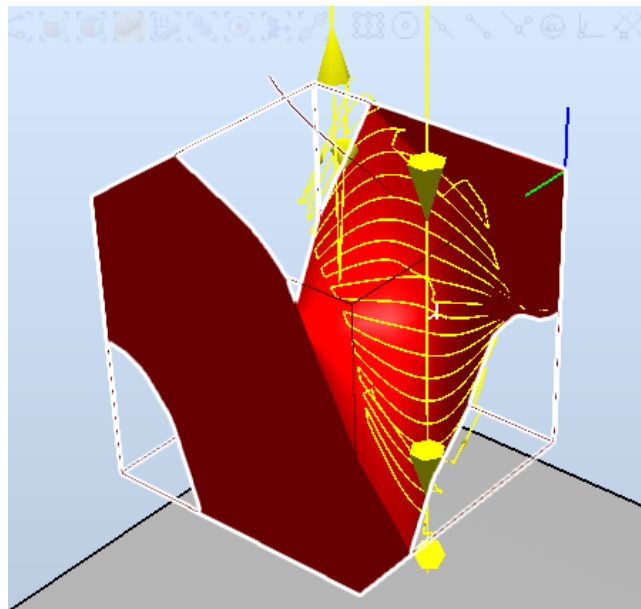


Figura 7.32 - Trajeto da primeira operação do puzzle no RobotStudio®.

Ensaaios experimentais

O primeiro ensaio foi realizado num bloco como o da Figura 7.33. A posição do *workobject* foi definida na interceção das linhas visíveis na imagem, e tinha as coordenadas cartesianas de (1064;541.6;731) em relação ao referencial do robô.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

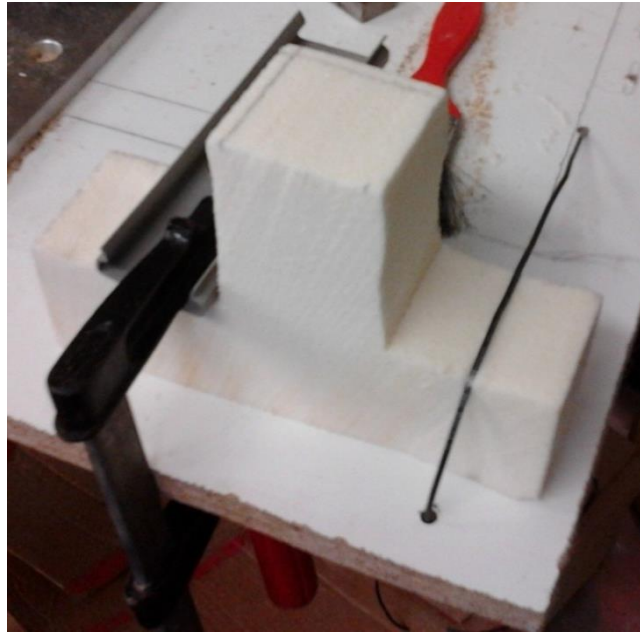


Figura 7.33 - Bloco de material para o primeiro ensaio de maquinagem do puzzle.

Resultados

O primeiro ensaio mostrou uma superfície interior (a peça foi tratada como duas superfícies simétricas) com um acabamento bastante bom, para as características da fresa. No entanto, a outra superfície, apresenta uma qualidade consideravelmente pior, surpreendentemente, pois as duas faces foram definidas exatamente com os mesmos parâmetros no programa de CAM. A Figura 7.34 ilustra a diferença entre as duas superfícies.

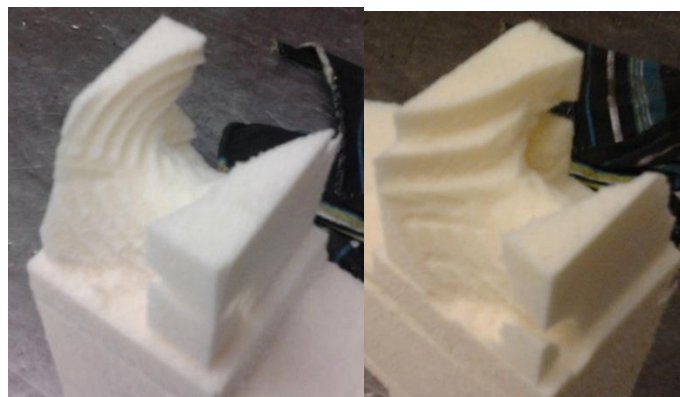


Figura 7.34 - Resultado do primeiro ensaio da maquinagem do puzzle.

Como o resultado obtido não foi o pretendido, decidiu-se então refazer o programa de maneira a eliminar a disparidade entre as duas superfícies. Ainda se alterou o *stepover* para o valor de 1mm para alcançar uma qualidade mais elevada.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Executado o segundo ensaio, verificou-se uma qualidade superficial consideravelmente mais elevada, ficando a superfície uniforme. No entanto o problema da disparidade entre as 2 faces persistiu, como se pode verificar na Figura 7.35.



Figura 7.35 - Resultado do 2º ensaio da maquinagem do puzzle.

Esta não simetria entre as faces deve-se a uma imprecisa definição do *Tool Center Point* da ferramenta. Foi verificado através de um teste de rotações em torno deste que a ponta da ferramenta alterava a sua posição, o que não era suposto se o *Tool Center Point* estivesse devidamente definido.

8. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo a maquinagem de peças que apresentam uma geometria complexa, e que obrigam o robô a movimentar-se em 5 eixos, por forma a demonstrar as possibilidades deste tipo de opção, mas também as suas limitações e maneiras de as contornar. Pode dizer-se que nesse sentido, o trabalho cumpriu o objetivo a que se propôs.

Após o término do trabalho, o estudo do caso em questão permite obter algumas conclusões:

Ainda existe alguma falta de informação sobre este tema, que naturalmente se deve à novidade que representa este tipo de sistema em que se usa um robô para maquinar. No entanto, pode dizer-se que a procura e o interesse por este tema é bastante alta, visto que nos últimos anos se tem vindo a desenvolver diversos sistemas deste género. Este interesse também é suscitado pelos casos de sucesso da aplicação desta tecnologia (Capítulo 4).

O *software* usado para gerar os programas NC, o Mastercam®, é uma ferramenta muito poderosa, uma vez que possui um vasto leque de opções em relação a processos não só de fresagem, como de furação, torneamento e muitos outros. Além disso possui um número enorme de pós-processadores, com a possibilidade de expansão para novas máquinas. Já a sua capacidade de CAD não é tão boa. É pouco expedita e difícil de usar quando comparada a programas como o SolidWorks®, também usado neste trabalho.

O *add-on* utilizado, RobotMaster®, constitui uma ferramenta bastante útil e pode dizer-se, fundamental neste projeto. Simples, muito fácil de usar, com uma interface de simulação bastante leve e fiável, e com possibilidade de alterar parâmetros importantes. Apenas pecará pela sua menos boa modelação cinemática do robô. Assim sendo, será muito arriscado passar o programa gerado diretamente para o controlador do robô, visto que o RobotMaster® não tem as definições corretas para as amplitudes de juntas, já que estas são influenciadas pela junta a montante, e isso não é contemplado neste *software*.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Recomenda-se sempre uma validação do programa gerado pelo MasterCam/Robotmaster usando para isso o programa RobotStudio® que tem uma cópia exata do controlador do robô.

A definição de novas ferramentas neste *software* também não é a mais expedita, porém, depois de definidas, torna-se bastante útil, uma vez que de seguida só é preciso definir as dimensões das fresas e o programa encarrega-se de calcular o seu *tool center point*.

Em relação ao RobotStudio®, é de realçar a facilidade com que se criam novas ferramentas, ao contrário do RobotMaster®. A sua interface de simulação também é bastante precisa e realista, simulando quase na perfeição o que se passa na realidade. A grande desvantagem deste *software* é a dificuldade de processamento se o programa tiver um número elevado de pontos. Se um programa for muito extenso, a passagem dos pontos para a estação virtual leva muito tempo e o processamento e visualização destes ficam muito lentos. Este facto pode ser contornado se se correr o programa num computador mais poderoso.

A grande vantagem da utilização deste programa é a possibilidade de se poder escolher as configurações do robô para cada ponto. Assim, evitam-se movimentos inesperados que não foram previstos pelo RobotMaster®.

A maquinagem de geometrias complexas a partir de um sistema robótico é perfeitamente possível, no entanto ela implica um conhecimento bastante vasto na área da maquinagem por forma a escolher os parâmetros ideais para cada operação, como a estratégia de controlo do eixo da ferramenta, bem como uma destreza a trabalhar com *software* de programação *offline*, já que muitas vezes, os percursos obtidos no programa de CAM não são exequíveis sem que sejam feitas algumas alterações.

A principal dificuldade em maquinar com a peça completamente fixa, é a impossibilidade de o robô atingir certos pontos, tendo-se que colocar a peça numa posição que é difícil de replicar na célula real, p.e., rodada em relação a mais que um eixo. Poderia ser solucionada essa situação com o auxílio a uma mesa posicionadora. Acrescenta-se ainda a existência dos cabos elétricos e tubos pneumáticos que ligam o controlador do motor-árvore a este, que não são facilmente modeláveis, mas que, apesar de tudo, existem na célula real e são um fator a ter em conta. A correta definição do Tool Center Point é fundamental para a realização dos percursos de maquinagem programados.

.

O material escolhido para maquinar é muito macio e permite obter resultados bastantes satisfatórios, o que veio a revelar-se uma boa escolha, pois com esse material reduziu-se o risco de dano para o robô. Pode-se então extrapolar que um robô mais robusto poderá maquinar materiais mais duros como alumínio e até aços macios.

A escolha da fresa também é um fator importante e neste trabalho foi, de certo modo, um entrave à obtenção de superfícies com melhor qualidade, visto que era uma fresa

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

plana, o que não traz grandes resultados quando não se maquina perpendicularmente à superfície.

Como trabalho futuro sugere-se a utilização de diferentes materiais e ferramentas, bem como o estudo de parâmetros como a zona ou a velocidade e a sua influência na qualidade da peça final. Outro caso interessante seria adicionar algum mecanismo de posicionamento da peça, bem como a possibilidade de troca de ferramenta, de modo a recriar uma verdadeira estação de maquinagem.

9. Referências

- [1] I. F. o. Robotics, “Statistics - IFR International Federation of Robotics,” [Online]. Available: <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>. [Acedido em 15 06 2013].
- [2] I. Spectrum, “The Rise of the Machines - IEEE Spectrum,” [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-rise-of-the-machines/0>. [Acedido em 15 06 2013].
- [3] M. T. University, “Machining Processes,” [Online]. Available: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining.html>. [Acedido em 20 02 2013].
- [4] “Define machining | Dictionary and Thesaurus,” [Online]. Available: <http://machining.askdefine.com/>. [Acedido em 23 02 2013].
- [5] M. P. Groover, INDUSTRIAL ROBOTICS. Technology, Programming and Applications, McGraw-Hill International Editions, 1986.
- [6] M. Barbosa, “Comando Numérico Computadorizado: Acetatos de apoio as aulas,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [7] S. Kalpakjian, Manufacturing Processes For Engineering Materials, 4th ed., Pearson Education, 2009.
- [8] G. Boothroyd e W. Knight, Fundamentals of Machining And Machine Tools, Taylor & Francis, 2006.
- [9] H. Gerling, Alrededor de las MÁQUINAS-HERRAMIENTA, 3ª Edição ed., Editorial Reverté, 2000.
- [10] Demec, Fresagem e Fresadoras, acetatos de apoio à disciplina de Processos de Fabrico I, FEUP.

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

- [11] P. Krar, A. Gill e P. Smid, CNC Simplified, Industrial Press Inc., 2001.
- [12] B. Pabla e M. Adithan, CNC Machines, New Age International, 1994.
- [13] “FAGOR AUTOMATION,” [Online]. Available: www.fagorautomation.com. [Acedido em 25 02 2013].
- [14] S.-H. Suh, Theory and Design of CNC Systems, Springer, 2008.
- [15] É. P. F. d. Lausanne, “LICP,” [Online]. Available: <http://licpwww.epfl.ch>. [Acedido em 26 02 2013].
- [16] R. Pasko, L. Przybylski e B. Slodki, “HIGH SPEED MACHINING - The effective way of modern cutting,” *International Workshop CA Systems And Technologies*, pp. 72-79.
- [17] H. Schulz, “The History of High Speed Machining,” *Revista de Ciencia e Tecnologia - 13*, pp. 9 -18, 06 1999.
- [18] U. o. Cambridge, “The Basics of Milling,” [Online]. Available: <http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/cad/powermill/introduction.pdf>.
- [19] ABB, “The ABB Group - Automation and Power Technology,” ABB, [Online]. Available: <http://www.abb.com/>. [Acedido em 31 03 2013].
- [20] F. Corporation, “FANUC CORPORATION,” Fanuc, [Online]. Available: <http://www.fanuc.co.jp/eindex.htm>. [Acedido em 31 03 2013].
- [21] P. Abreu, “Robótica, Apontamentos de Apoio as Aulas,” FEUP, Porto, 2012.
- [22] ABB, “Introduction to RobotStudio, Terms and Concepts,” em *RobotStudio Operating Manual*, 2012.
- [23] ABB, “IRB Robotics - Industrial Robots,” [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/63544e22dd7ecbd9c125772e005a6ae3/\\$file/ROB0053%20EN_C.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/63544e22dd7ecbd9c125772e005a6ae3/$file/ROB0053%20EN_C.pdf). [Acedido em 04 06 2013].
- [24] I. Fanuc Robotics America, “F-200iB,” 2005. [Online]. Available: http://www.fanucrobotics.com/cmsmedia/datasheets/F-200iB%20Series_9.pdf. [Acedido em 04 06 2013].
- [25] K. R. GmbH, “KUKA Industrial Robots: KR 500-3 MT,” 2013. [Online]. Available: http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/heavy/kr500_2_mt/start.htm. [Acedido em 04 06 2013].
- [26] Staübli, “High Speed Machining Robots,” 2013. [Online]. Available: <http://www.staubli.com/en/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/specialized-robot/high-speed-machining-robots/>. [Acedido em 04 06 2013].
- [27] Delcam, “PowerMILL CAM Software,” Delcam, [Online]. Available: <http://www.powermill.com/overview/index.asp>. [Acedido em 03 04 2013].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

- [28] Delcam, “PowerMill Robot Interface,” [Online]. Available: <ftp://arrow.delcam.com/pdf/powermill/en/PowerMILL-Robot-Machining.pdf>. [Acedido em 03 04 2013].
- [29] C. S. Inc., “Mastercam: About us,” [Online]. Available: <http://www.mastercam.com/AboutUs/CorporateProfile/Default.aspx>. [Acedido em 03 06 2013].
- [30] C. S. Inc., “MasteCAM: Products,” [Online]. Available: <http://www.mastercam.com/Products/Default.aspx>. [Acedido em 03 06 2013].
- [31] C. S. Inc., “Mastercam Xtras: Mastercam X design LT available,” [Online]. Available: <http://blog.mastercam.com/2007/02/mastercam-x-design-lt-available.html>. [Acedido em 03 06 2013].
- [32] C. S. Inc., “Mastercam 2D HST Toolpaths,” [Online]. Available: http://www.mastercam.com/camzone/newszone/PressKits/November_2D_HST/default.htm. [Acedido em 03 06 2013].
- [33] C. S. Inc., “Mastercam X5 Sneak Preview 4: Machine Simulation,” [Online]. Available: <http://blog.mastercam.com/2010/10/mastercam-x5-sneak-preview-4-machine.html>. [Acedido em 03 06 2013].
- [34] C. S. Inc., “Mastercam Xtras: ICAM NC Post-Processors for Mastercam,” [Online]. Available: <http://blog.mastercam.com/2011/05/icam-nc-post-processors-for-mastercam.html>. [Acedido em 03 06 2013].
- [35] J. Barbosa, “Concepção e Simulação de Célula Robotizada,” FEUP, Porto, 2010.
- [36] D. Lloyd, “Staubli machining robots used to sculpt stone,” [Online]. Available: <http://www.advancedmanufacturing.co.uk/features/staubli-machining-robots-used-sculpt-stone>. [Acedido em 12 06 2013].
- [37] R. Afonso, “Concepção de um Sistema Robótico para Prototipagem,” FEUP, Porto, 2010.
- [38] M. Sirviö, “Patternless casting is ideal for prototyping,” *HiTech Finland*, 2008.
- [39] M. Sirviö e M. Wos, “Casting directly from a computer model by using advanced,” em *ARCHIVES OF FOUNDRY ENGINEERING*, Vol.9, 2009, pp. 79-82.
- [40] J. Barbosa, “Concepção e Simulação de Célula Robotizada,” FEUP, Porto, 2010.
- [41] T. Design, “6 axis robot machining,” 2005. [Online]. Available: <http://www.tromesdesign.com/Robot.htm>. [Acedido em 12 06 2013].
- [42] ABB, “ABB IRB 2400 - Robots (Robotics),” ABB, [Online]. Available: <http://www.abb.com/product/seitp327/657d58e39c804f64c1256efc002860a7.aspx?productLanguage=us&country=GB>. [Acedido em 30 03 2013].

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

- [43] ABB, “ABB IRC5 - Controllers (Robotics),” [Online]. Available: <http://www.abb.com/product/seitp327/f0cec80774b0b3c9c1256fda00409c2c.aspx>. [Acedido em 30 03 2013].
- [44] ABB, “ABB IRPB C - Workpiece Positioners,” [Online]. Available: <http://www.abb.com/product/seitp327/005a650ac570f774c125771c00426051.aspx?productLanguage=us&country=GB>. [Acedido em 30 03 2013].
- [45] A. I. Automation, “ATI Force/Torque Sensor: Delta IP60,” ATI Industrial Automation, [Online]. Available: http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Delta%20IP60. [Acedido em 30 03 2013].
- [46] Schunk, “SWS_011_EN.pdf,” [Online]. Available: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/SWS_011_EN.pdf. [Acedido em 30 03 2013].
- [47] PrecisionDriveSystems, “Operator Manual - XLC/A-070,” 2011.
- [48] N. Rodrigues, “Célula Robótica industrial: aplicação de ferramentas CAD / CAM na programação de robôs,” FEUP, Porto, 2011.
- [49] H. CNC, “Catálogo de Pinzas, Collets,” 2002.
- [50] Y. Chen e F. Dong, “Robot machining: recent development and future research issues,” *Springer*, 29 July 2012.
- [51] P. Waurzyniak, “MACHINING WITH ROBOTS. Advances in robotics, control software enable using robot in material-removal application,” *Manufacturing Engeneering*, November 2009.
- [52] M. Fei, Z. Haiou e W. Guilan, “Application of industrial robot in rapid prototype manufacturing technology,” em *2nd ICIMA*, Wuhan, China, 2010.

Anexos

**Anexo A - Datasheet do robô industrial ABB
IRB2400/16**

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Robotics

IRB 2400 Industrial Robot

Main Applications

Arc welding
Cutting/Deburring
Glueing/Sealing
Grinding/Polishing
Machine tending
Material handling



Most popular industrial robot

IRB 2400 comprises a complete family of application optimized robots that maximize the efficiency of your arc welding, process and tending applications.

The IRB 2400 is a real hard worker. It can take additionally 35 kg load on axis 1 and up to 12 kg additional load on the upper arm - still keeping 100 % duty cycle.

Other models offer handling capacity of up to 20 kg, excellent motion control, large load offset and unlimited motion in axis 6.

This means there's an IRB 2400 robot to give you excellent

performance in your material handling, tending and process applications. All models offer you inverted mounting capability.

The compact design of the IRB 2400 ensures ease of installation. The robust construction and use of minimum parts contribute to high reliability and long intervals between maintenance.

The Foundry Plus 2 version is washable with high pressure steam and it's supplied with increased environment protection meeting IP 67 standard.

Power and productivity
for a better world™

ABB

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

IRB 2400

Main applications

Arc welding, cutting/deburring, glueing/sealing, grinding/polishing, machine tending, material handling

Specification

Variants	Reach	Payload	Protection
IRB 2400-10	1.55 m	12 kg	FoundryPlus
IRB 2400-16	1.55 m	20 kg	FoundryPlus

Number of axes	6	
Mounting	Floor and inverted all versions. Wall IRB 2400-10	
Supplementary load	IRB 2400-10	IRB 2400-16
Upper arm		
-wrist end	2 kg	2 kg
-rear end	10 kg	10 kg
Base unit	35 kg	35 kg

Physical

Dimensions	IRB 2400-10	IRB 2400-16
Total height	1564 mm	1564 mm
Robot base	723x600 mm	723x600 mm
Robot weight	380 kg	380 kg

Performance (according to ISO 9283)

Position repeatability (RP)	0.03 mm
Path repeatability	0.11-0.15 mm depending on variant

Movements

Axis	IRB 2400-10	IRB 2400-16
Working range		
Axis 1	360°**	360°
Axis 2	210°	210°
Axis 3	125°	125°
Axis 4	400°	400°
Axis 4, Option	Unlimited	Unlimited
Axis 5	240°	240°
Axis 6	800°	800°
Axis 6, Option	Unlimited	Unlimited

Max. speed

Axis 1	150°/s 90° **	150°/s
Axis 2	150°/s 90° **	150°/s
Axis 3	150°/s 90° **	150°/s
Axis 4	360°/s	360°/s
Axis 5	360°/s	360°/s
Axis 6	450°/s	450°/s

**) For wall mounted version

*) $\pm 30^\circ$ for wall mounted robot

Electrical Connections

Supply voltage	200-600 V, 50/60 Hz
Power consumption	ISO-Cube at max speed 0.67 kW

Environment

Ambient temperature for mechanical unit:	
During operation	+5°C (41°F) to +45°C (113°F)
Relative humidity	Max. 95%

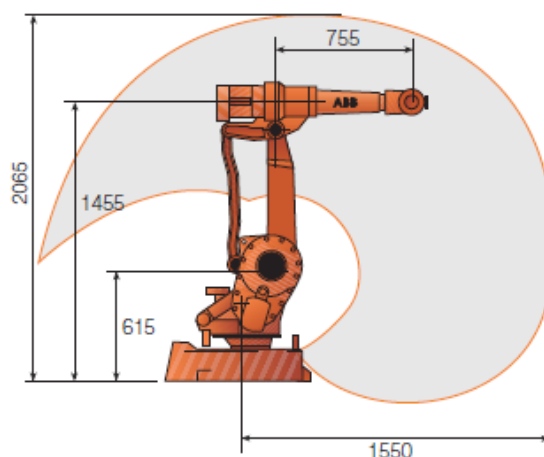
Degree of protection	IRB 2400-10	IRB 2400-16
Standard	IP54	IP54
Foundry Plus 2 version	IP67	IP67

Noise level	Max. 70 dB (A)
Emission	EMC/EMI-shielded

Data and dimensions may be changed without notice

Working range

IRB 2400-10, IRB 2400-16



Anexo B - Datasheet do controlador ABB IRC5

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

Robotics

IRC5

Industrial Robot Controller

Fifth generation robot controller

Based on more than four decades of robotics experience, the IRC5 sets a benchmark in the robotics industry. In addition to ABB's unique motion control it brings flexibility, safety, modularity, customer adapted user interface, multi robot control and PC tool support.



Safety

Operator safety is a central quality of the IRC5, fulfilling all relevant regulations with good measure, as certified by third-party inspections. Electronic position switches and SafeMove represent a new generation of safety, enabling more flexible cell safety concepts, e.g. involving collaboration between robot and operator.

Motion control

Based on advanced dynamic modelling, the IRC5 optimizes the performance of the robot for the physically shortest possible cycle time (QuickMove) and precise path accuracy (TrueMove). Together with a speed-independent path, predictable and high-performance behavior is delivered automatically, with no tuning required by the programmer. What you program is what you get.

Modularity

The IRC5 comes in different variants in order to provide a cost-effective solution for every need. The ability to stack modules on top of each other, put them side by side or distributed in the cell is a unique feature, leading to optimization of footprint and cell layout.

The compact variant comes with the IRC5 capabilities in a true compact format, able to control the lower end of the IRB range.

The panel-mounted version comes without a cabinet, enabling integration in any encapsulation for exceptional compactness or for special environmental requirements.

FlexPendant

The FlexPendant is characterized by its clean, color touch screen-based design and 3D joystick for intuitive interaction. Powerful customized application support enables loading of

tailor-made applications, e.g. operator screens, thus eliminating the need for a separate operator HMI.

RAPID programming language

RAPID programming provides the perfect combination of simplicity, flexibility and power. It is a truly unlimited language with support for structured programs, shop floor language and advanced features. It also incorporates powerful support for many process applications.

Communication

The IRC5 supports the state-of-the-art field buses for I/O and is a well-behaved node in any plant network. Sensor interfaces, remote disk access and socket messaging are examples of the many powerful networking features.

Remote Service enabled

Remote monitoring of the robot is available through GSM or Ethernet. Advanced diagnostics allow fast investigation on failure as well as monitoring of the robot condition throughout the life cycle. Service packages include backup management, reporting and proactive maintenance activities.

RobotStudio

A powerful PC tool for working with IRC5 data on-line as well as off-line. In off-line mode, RobotStudio provides a perfect digital copy of the robot system together with strong programming and simulation features.

MultiMove

Control of up to four robots from one controller, with a compact drive module added for each additional robot. MultiMove opens up previously unthinkable operations, thanks to the perfect coordination of complex motion patterns.

Power and productivity
for a better world™



Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

IRC5

Specification		User interfaces continued	
Control hardware:	Multi-processor system PCI bus Pentium® CPU Flash disk for mass memory Energy back-up power failure handling USB memory interface	Maintenance:	Status LEDs Diagnostic software Recovery procedures Logging with time stamp Remote Service enabled
Control software:	Object-oriented design High-level RAPID programming language Portable, open, expandable PC-DOS file format RobotWare software products Preloaded software, also available on DVD	Safety	
Electrical Connections		Basic:	Safety and emergency stops 2-channel safety circuits with supervision 3-position enabling device
Supply voltage:	3 phase 200-600 V, 50-60 Hz Integrated transformer or direct mains connection 1 phase 220/230 V, 50-60 Hz (for Compact Controller only)	Electronic Position	
Physical		Switches:	5 safe outputs monitoring axis 1-7
	Size H x W x D	SafeMove:	Supervision of stand-still, speed, position and orientation (robot and additional axes) 8 safe inputs for function activation, 8 safe monitoring outputs
Single cabinet	970 x 725 x 710 mm	150 kg	
Dual cabinet	1370 x 725 x 710 mm	180 kg	
Control module	720 x 725 x 710 mm	50 kg	
Drive module	720 x 725 x 710 mm	130 kg	
Empty cabinet for customer equipment	- small 720 x 725 x 710 mm - large 970 x 725 x 710 mm	35 kg 42 kg	
Panel Mounted *)			
Control module	375 x 498 x 271 mm	12 kg	
Drive module small *)	375 x 498 x 299 mm	24 kg	
Drive module large *)	658 x 498 x 425 mm	40 kg	
Compact controller **)	258 x 450 x 580 mm	27.5 kg	
*) IRB 140, 340, 1600, 260			
**) IRB 2400, 2600, 4400, 4600, 6620, 6640, 6650, 7600, 660, 760			
**) IRB 120, 140, 260, 360, 1410, 1600			
Environment		Machine Interfaces	
Ambient temperature:	0-45°C (32-113°F) option 0-52°C (32-125°F)	Inputs/outputs:	Up to 8192 signals
Relative humidity:	Max. 95% non condensing	Digital:	24V DC or relay signals
Level of protection:	IP 54 (cooling ducts IP 33) Panel Mounted and Compact IP 20	Analogue:	2 x 0-10V, 3 x ± 10V, 1 x 4-20mA
Fulfillment of regulations:	Machine directive 98/37/EC regulations Annex II B EN 60204-1:2006 ISO 10218-1:2006 ANSI/RIA R 15.06 - 1999 UL 1740-1998	Serial channel:	1 x RS 232/RS 422 with adapter
User Interfaces		Network:	Ethernet(10/100 Mbps per second)
Control panel:	On cabinet or remote	Two channels:	Service and LAN
FlexPendant:	Weight 1 kg Graphical color touch screen Joystick Emergency stop Hot plug Support for right and left-handed operators USB Memory support	Fieldbus Master:	DeviceNet™ PROFINET PROFIBUS DP Ethernet/IP™ Allen-Bradley Remote I/O CC-link
		Fieldbus Slave:	DeviceNet™ PROFINET PROFIBUS DP Ethernet/IP™ Allen-Bradley Remote I/O CC-link
		Conveyor encoder	Up to 6 channels
		Integrated PLC	AC500
		Sensor Interfaces	Search stop with automatic program shift Seam/contour tracking Conveyor tracking Machine vision Force Control
Data and dimensions may be changed without notice.			



Compact controller

Panel mounted controller

www.abb.com/robotics

Power and productivity
for a better world™



**Anexo C - Datasheet da mesa posicionadora ABB
IRPB C-500**

Robotics

IRC5

Industrial Robot Controller

Fifth generation robot controller

Based on more than four decades of robotics experience, the IRC5 sets a benchmark in the robotics industry. In addition to ABB's unique motion control it brings flexibility, safety, modularity, customer adapted user interface, multi robot control and PC tool support.



Safety

Operator safety is a central quality of the IRC5, fulfilling all relevant regulations with good measure, as certified by third-party inspections. Electronic position switches and SafeMove represent a new generation of safety, enabling more flexible cell safety concepts, e.g. involving collaboration between robot and operator.

Motion control

Based on advanced dynamic modelling, the IRC5 optimizes the performance of the robot for the physically shortest possible cycle time (QuickMove) and precise path accuracy (TrueMove). Together with a speed-independent path, predictable and high-performance behavior is delivered automatically, with no tuning required by the programmer. What you program is what you get.

Modularity

The IRC5 comes in different variants in order to provide a cost-effective solution for every need. The ability to stack modules on top of each other, put them side by side or distributed in the cell is a unique feature, leading to optimization of footprint and cell layout.

The compact variant comes with the IRC5 capabilities in a true compact format, able to control the lower end of the IRB range.

The panel-mounted version comes without a cabinet, enabling integration in any encapsulation for exceptional compactness or for special environmental requirements.

FlexPendant

The FlexPendant is characterized by its clean, color touch screen-based design and 3D joystick for intuitive interaction. Powerful customized application support enables loading of

tailor-made applications, e.g. operator screens, thus eliminating the need for a separate operator HMI.

RAPID programming language

RAPID programming provides the perfect combination of simplicity, flexibility and power. It is a truly unlimited language with support for structured programs, shop floor language and advanced features. It also incorporates powerful support for many process applications.

Communication

The IRC5 supports the state-of-the-art field busses for I/O and is a well-behaved node in any plant network. Sensor interfaces, remote disk access and socket messaging are examples of the many powerful networking features.

Remote Service enabled

Remote monitoring of the robot is available through GSM or Ethernet. Advanced diagnostics allow fast investigation on failure as well as monitoring of the robot condition throughout the life cycle. Service packages include backup management, reporting and proactive maintenance activities.

RobotStudio

A powerful PC tool for working with IRC5 data on-line as well as off-line. In off-line mode, RobotStudio provides a perfect digital copy of the robot system together with strong programming and simulation features.

MultiMove

Control of up to four robots from one controller, with a compact drive module added for each additional robot. MultiMove opens up previously unthinkable operations, thanks to the perfect coordination of complex motion patterns.

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico

IRC5

Specification		User interfaces continued	
Control hardware:	Multi-processor system PCI bus Pentium® CPU Flash disk for mass memory Energy back-up power failure handling USB memory interface	Maintenance:	Status LEDs Diagnostic software Recovery procedures Logging with time stamp Remote Service enabled
Control software:	Object-oriented design High-level RAPID programming language Portable, open, expandable PC-DOS file format RobotWare software products Preloaded software, also available on DVD	Basic:	Safety and emergency stops 2-channel safety circuits with supervision 3-position enabling device
Electrical Connections		Safety	
Supply voltage:	3 phase 200-600 V, 50-60 Hz Integrated transformer or direct mains connection 1 phase 220/230 V, 50-60 Hz (for Compact Controller only)	Electronic Position Switches:	6 safe outputs monitoring axis 1-7
		SafeMove:	Supervision of stand-still, speed, position and orientation (robot and additional axes) 8 safe inputs for function activation, 8 safe monitoring outputs
Physical		Machine Interfaces	
	Size H x W x D	Inputs/outputs:	Up to 8192 signals
Single cabinet	970 x 725 x 710 mm	Digital:	24V DC or relay signals
Dual cabinet	1370 x 725 x 710 mm	Analogue:	2 x 0-10V, 3 x ± 10V, 1 x 4-20mA
Control module	720 x 725 x 710 mm	Serial channel:	1 x RS 232/RS 422 with adapter
Drive module	720 x 725 x 710 mm	Network:	Ethernet(10/100 Mbps per second)
Empty cabinet for customer equipment	- small 720 x 725 x 710 mm - large 970 x 725 x 710 mm	Two channels:	Service and LAN
Panel Mounted *)		Fieldbus Master:	DeviceNet™ PROFINET PROFIBUS DP Ethernet/IP™
Control module	375 x 498 x 271 mm	Fieldbus Slave:	DeviceNet™ PROFINET PROFIBUS DP Ethernet/IP™ Allen-Bradley Remote I/O CC-link
Drive module small **)	375 x 498 x 299 mm	Conveyor encoder	Up to 8 channels
Drive module large **)	658 x 498 x 425 mm	Integrated PLC	AC600
Compact controller **)	258 x 450 x 580 mm	Sensor Interfaces	Search stop with automatic program shift Seam/contour tracking Conveyor tracking Machine vision Force Control
*) IRB 140, 340, 1600, 260		Data and dimensions may be changed without notice.	
**) IRB 2400, 2600, 4400, 4600, 6620, 6640, 6650, 7600, 660, 760			
**) IRB 120, 140, 260, 360, 1410, 1600			
Environment			
Ambient temperature:	0-45°C (32-113°F) option 0-52°C (32-125°F)		
Relative humidity:	Max. 95% non condensing		
Level of protection:	IP 54 (cooling ducts IP 33) Panel Mounted and Compact IP 20		
Fulfilment of regulations:	Machine directive 98/37/EC regulations Annex II B EN 60204-1:2006 ISO 10218-1:2006 ANSI/RIA R 15.06 - 1999 UL 1740-1998		
User Interfaces			
Control panel:	On cabinet or remote		
FlexPendant:	Weight 1 kg Graphical color touch screen Joystick Emergency stop Hot plug Support for right and left-handed operators USB Memory support		



Compact controller

Panel mounted controller

Power and productivity
for a better world™



www.abb.com/robotics

© Copyright ABB Robotics. PR10258EN_R13 September 2011.